

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA
INGENIERIA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA

OPTIMIZACIÓN DEL MODELO BOUC-WEN DE UN AMORTIGUADOR MAGNETO- REOLÓGICO MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

AUTOR: D. DIEGO OVIEDO GUTIÉRREZ
TUTOR: Dra. BEATRIZ LÓPEZ BOADA
Dra. M^a JESÚS LÓPEZ BOADA

Abril 2010

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Objetivos.....	7
1.2. Organización del proyecto	7
2. LA SUSPENSIÓN	10
2.1. El pasado	11
2.2. El presente	13
<i>2.2.1 Características que debe reunir la suspensión</i>	<i>13</i>
<i>2.2.2 Influencia de la carga en la suspensión</i>	<i>14</i>
<i>2.2.3 Efectos de un elemento de flexibilidad variable.....</i>	<i>14</i>
2.3. Componentes de la suspensión	15
<i>2.3.1 Elementos de suspensión simples</i>	<i>15</i>
<i>2.3.2 Barras estabilizadoras.....</i>	<i>18</i>
<i>2.3.3 Silentblocks y cojinetes elásticos.....</i>	<i>19</i>
<i>2.3.4 Rótulas</i>	<i>19</i>
<i>2.3.5 Mangueta y buje</i>	<i>20</i>
<i>2.3.6 Trapecios o brazos de suspensión</i>	<i>20</i>
<i>2.3.7 Tirantes de suspensión</i>	<i>21</i>
<i>2.3.8 Topes de suspensión</i>	<i>21</i>
<i>2.3.9 Amortiguadores</i>	<i>21</i>
2.4. Tipos de suspensión mecánica	22
<i>2.4.1 Suspensiones rígidas</i>	<i>22</i>
<i>2.4.2 Suspensión semi-rígida.....</i>	<i>24</i>
<i>2.4.3 Suspensión independiente.....</i>	<i>25</i>
2.5. Suspensiones regulables o pilotadas.....	31
<i>2.5.1 Suspensiones activa</i>	<i>32</i>
<i>2.5.2 Suspensiones semiactivas</i>	<i>33</i>
3. EL AMORTIGUADOR	36
3.1 Función de los amortiguadores	36
3.2. Descripción del funcionamiento y partes del amortiguador.....	37
<i>3.2.1. Tipos de amortiguadores</i>	<i>38</i>
3.3. Amortiguadores magneto-reológicos	47
4. MATERIALES INTELIGENTES.....	51

4.1 Materiales con memoria de forma	52
4.1.1 <i>Materiales electro y magneto-activos.....</i>	54
4.1.2 <i>Materiales foto y cromo-activos.....</i>	54
4.1.3 <i>Fluidos electro-reológicos y fluidos magneto-reológicos.....</i>	55
4.2 Fluidos reológicos	56
4.3 Fluidos magneto-reológicos	58
4.4 Aplicaciones de los fluidos magneto-reológicos	59
4.4.1 <i>Suspensión de los asientos para vehículos de trabajo pesado.....</i>	59
4.4.2 <i>Amortiguadores de vibración.....</i>	60
4.4.3 <i>Control de vibración sísmica en estructuras.....</i>	60
4.4.4 <i>Prótesis médicas.....</i>	61
4.5 Amortiguación por fluidos magneto-reológicos en vehículos.....	62
4.5.1 <i>Beneficios</i>	63
5. MODELADO DE UN AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO.....	65
5.1 <i>Modelos de Bouc-Wen.....</i>	66
6. ALGORITMOS GENÉTICOS	70
6.1 <i>El Algoritmo Genético Simple.....</i>	71
6.1.1 <i>Codificación</i>	72
6.2 <i>Extensiones y Modificaciones del AGS.....</i>	72
6.2.1 <i>Población.....</i>	72
6.2.2 <i>Función objetivo.....</i>	73
6.2.3 <i>Selección.....</i>	75
6.2.4 <i>Cruce</i>	77
6.2.5 <i>Mutación.....</i>	80
6.2.6 <i>Reducción</i>	82
6.2.7 <i>Algoritmos Genéticos Paralelos.....</i>	83
6.2.8 <i>Evaluación de Algoritmos Genéticos</i>	84
7. RESULTADOS EXPERIMENTALES	87
8. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....	101
8.1. <i>Conclusiones.....</i>	101
8.2. <i>Desarrollos futuros</i>	101

9. ANEXO.....	103
10. BIBLIOGRAFÍA	106

1 Introducción

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de suspensión constituye una de las partes más importantes de un vehículo en cuanto a seguridad y confort se refiere. Las funciones principales de un sistema de suspensión son la de absorber las irregularidades del terreno y la de mantener el contacto del neumático con la calzada evitando, con ello, la pérdida de adherencia.

Hoy en día se están realizando numerosas investigaciones para mejorar la respuesta del sistema de suspensión mediante la incorporación de elementos que pueden variar sus propiedades de amortiguación o de rigidez (suspensiones semiactivas) o de actuadores que introducen una fuerza al sistema (suspensiones activas).

Dentro del primer grupo de suspensiones están cobrando cada vez más importancia los amortiguadores magneto-reológicos debido a su gran rapidez de respuesta, del orden de milisegundos. Este tipo de amortiguador es el principal objetivo de estudio en este Proyecto Fin de Carrera.

1.1. Objetivos

Los principales objetivos que se pretenden conseguir en el presente proyecto fin de carrera son los siguientes:

- Caracterizar el comportamiento dinámico de un amortiguador magneto-reológico.
- Ajustar unos parámetros a un modelo que permita simular el comportamiento dinámico del mismo.

1.2. Organización del proyecto

El contenido del proyecto fin de carrera se encuentra distribuido en 9 capítulos, el primero de los cuales está formado por la presente introducción.

El capítulo 2 presenta el sistema de suspensión, donde se muestran sus funciones y requisitos, así como los tipos existentes.

En el capítulo 3 se muestra el amortiguador, donde se describe su principio de funcionamiento básico, así como los distintos tipos de amortiguadores existentes.

El capítulo 4 muestra el amortiguador magneto-reológico, así como los materiales que lo conforman, “materiales inteligentes”, entre los que se encuentran los fluidos reológicos, destacando los fluidos magneto-reológicos. Por otro lado, también se trata la amortiguación por fluidos magneto-reológicos, así como sus aplicaciones fundamentales.

En el capítulo 5 se describen los diferentes modelos propuestos para caracterizar el comportamiento de un amortiguador magneto-reológico, dedicando especial atención al modelo de Bouc-Wen.

El capítulo 6 presenta la técnica de Algoritmos Genéticos (AGs), que se emplearán para resolver el problema de optimización que se plantea en el presente proyecto.

El capítulo 7 muestra los resultados experimentales obtenidos a partir de los ensayos realizados. Por otro lado, las principales conclusiones que han sido obtenidas a partir de dichos resultados experimentales se mostraran en el capítulo 8, así como las futuras líneas de desarrollo.

2 La Suspensión

2. LA SUSPENSIÓN

Se llama suspensión al conjunto de elementos elásticos que se interponen entre los órganos suspendidos (bastidor, carrocería, pasajeros y carga) y los órganos no suspendidos (ruedas y ejes) de un vehículo [1]. En la figura 2.1 se muestra la disposición del conjunto de la suspensión en un Renault Laguna.

La suspensión de un vehículo tiene como cometido “absorber” las desigualdades del terreno sobre el que se desplaza, a la vez que mantener las ruedas en contacto con el pavimento, proporcionando un adecuado nivel de confort y seguridad de marcha. Se puede decir que sus funciones básicas son las siguientes:

- Reducción de fuerzas causadas por irregularidades del terreno.
- Control de dirección del vehículo.
- Mantenimiento de la adherencia de los neumáticos a la carretera.
- Mantenimiento de la correcta alineación de la ruedas.
- Soporte de la carga del vehículo.
- Mantenimiento de la altura óptima del vehículo.

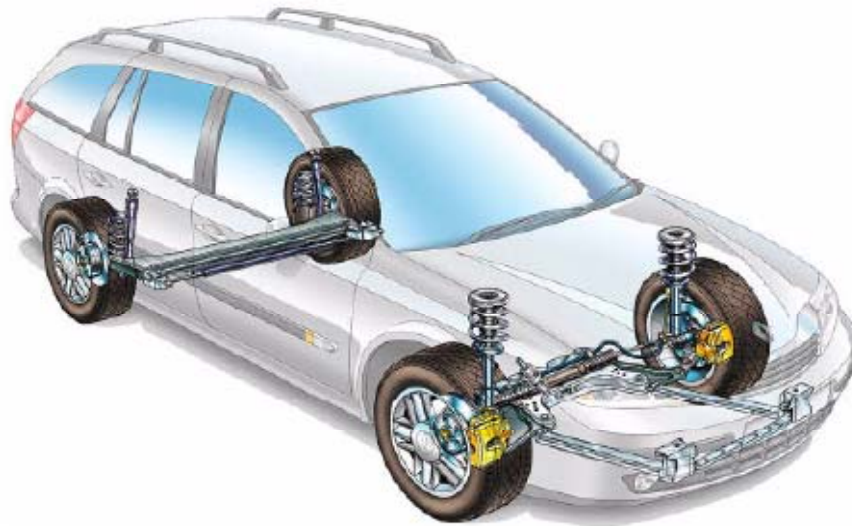


Figura 2.1 Disposición del conjunto de la suspensión del Renault Laguna

El peso del vehículo se descompone en dos masas denominadas:

- Masa suspendida: la integrada por todos los elementos cuyo peso es soportado por el bastidor o chasis (carrocería, motor, etc.).
- Masa no suspendida: constituida por el resto de los componentes (sistemas de freno, llantas, etc.).

El enlace entre ambas masas es materializado por el sistema de suspensión. Este sistema está compuesto por un elemento elástico (que bien puede ser una ballesta, muelle helicoidal, barra de torsión, estabilizador, muelle de goma, gas aire, etc.) y otro de amortiguación, cuya misión es neutralizar las oscilaciones de la masa suspendida originadas por el elemento elástico al adaptarse a las irregularidades del terreno transformando la energía que almacena el resorte en calor.

El comportamiento de un vehículo viene determinado en gran medida por el tipo de suspensión que lleve, así por ejemplo, es posible variar la característica del coche, subvirador o sobrevirador, como se muestra en la figura 2.2.

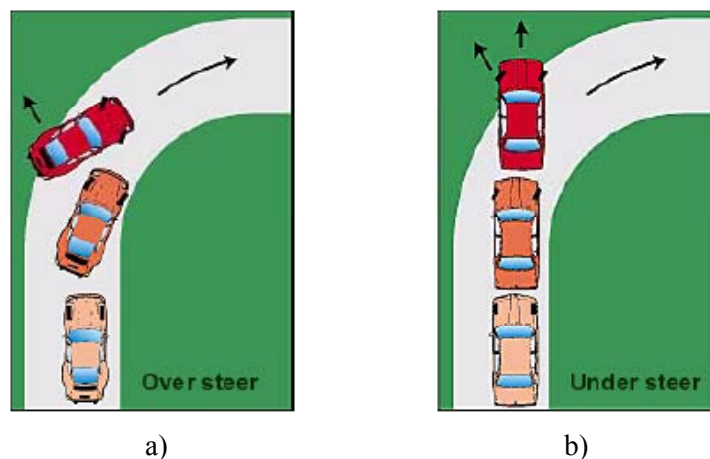


Figura 2.2. Comportamiento lateral de un vehículo. a) Sobrevirador. b) Subvirador.

Queda claro pues, que los amortiguadores representan uno de los componentes de mayor importancia en los vehículos. Es por ello que se pasa a detallar de forma concisa la evolución que estos han sufrido a lo largo de su historia, y asimismo describir los tipos más comunes.

2.1. El pasado

Los primitivos automóviles de finales del siglo XIX eran básicamente carruajes de caballos con motor. De hecho hasta 1898 las primeras suspensiones eran simples ballestas (figura 2.3), que aunaban cualidades elásticas con cierto poder amortiguante, como la de los coches de caballo. Las velocidades que alcanzaban eran muy reducidas y apenas necesitaban suspensión. Según fueron incrementándose las prestaciones se fue

haciendo patente la exigencia de dotarlos de confort y manejabilidad [2]. Enseguida se vió la necesidad de amortiguar el movimiento oscilatorio que creaban las ballestas. Así, entre 1898 y 1899 y basándose en un invento para las bicicletas, los fabricantes empiezan a instalar los primeros amortiguadores que consistían en dos simples brazos unidos mediante un tornillo con un disco de fricción entre ellos como se muestra en la figura 2.4. La resistencia se ajustaba apretando o aflojando el tornillo. Como es de esperar, estos amortiguadores no eran muy duraderos, y su funcionamiento dejaba bastante que desear [3].



Figura 2.3. Ballesta primitiva.

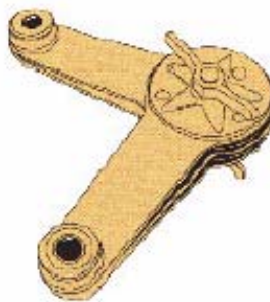


Figura 2.4 Amortiguador de fricción.

Entre los inconvenientes que presentaban los amortiguadores de fricción frente a los actuales amortiguadores hidráulicos se encuentran los siguientes:

- En tanto no se supera la fuerza de fricción, la suspensión permanece bloqueada, y el vehículo queda sin suspensión.
- Una vez superada dicha fuerza de fricción, la fuerza amortiguadora disminuye en vez de aumentar con la velocidad, como sería deseable.
- Su comportamiento se altera con el desgaste.
- Es necesario reponer las piezas desgastadas periódicamente.

2.2. El presente

La necesidad de una continua mejora en las prestaciones de los sistemas de suspensión en los vehículos ha hecho que estos evolucionen hasta el punto de llegar a la especialización. Dependiendo de la finalidad del vehículo se le aplican diferentes suspensiones. Como ejemplo se tiene la diferencia entre vehículos todoterreno y vehículos de competición, donde la necesidad de adaptación de los primeros al suelo hace que se monten suspensiones blandas con gran recorrido, mientras que en el caso de los coches de competición, contando con un firme uniforme, se utilizan suspensiones muy rígidas con poco recorrido [4].

Independientemente del tipo de suspensión a utilizar, dicho sistema siempre presenta dos factores en común, el confort y la seguridad, temas que se tratarán con posterioridad.

2.2.1 Características que debe reunir la suspensión

Como los elementos de suspensión han de soportar todo el peso del vehículo, deben ser lo suficientemente fuertes para que las cargas que actúan sobre ellos no produzcan deformaciones permanentes [5].

A su vez, deben ser muy elásticos, para permitir que las ruedas se adapten continuamente al terreno sin separarse de él. Esta elasticidad en los elementos de unión produce una serie de oscilaciones de intensidad decreciente que no cesan hasta que se ha devuelto la energía absorbida, lo que coincide con la posición de equilibrio de los elementos en cuestión; dichas oscilaciones deben ser amortiguadas hasta un nivel razonable que no ocasione molestias a los usuarios del vehículo.

La experiencia demuestra que el margen de comodidad para una persona es de 1 a 2 oscilaciones por segundo; una cifra superior excita el sistema nervioso, aunque tampoco conviene bajar el valor mínimo porque se favorece el mareo.

Como se puede ver en la figura 2.5, un muelle blando tiene gran recorrido y pequeño número de oscilaciones bajo la carga, mientras que un muelle duro tiene menor recorrido y mayor número de oscilaciones. Este mismo efecto se manifiesta al variar la carga que gravita sobre el muelle.

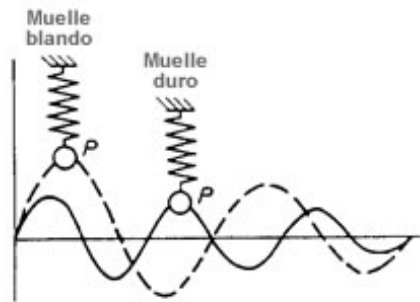


Figura 2.5 Influencia de la dureza del muelle en las oscilaciones.

2.2.2 Influencia de la carga en la suspensión

Si en los vehículos las cargas fueran constantes resultaría fácil adaptar una suspensión ideal, pero como esto no se da en ningún caso (al ser la carga variable, especialmente en vehículos de transporte) los elementos elásticos deben calcularse para que aguanten el peso máximo sin pérdida de elasticidad.

En estas condiciones es imposible obtener una suspensión ideal ya que, si se calcula para un peso mínimo, la suspensión resulta blanda en exceso cuando el peso del vehículo aumenta; si se calcula para el peso máximo, entonces resulta dura cuando el vehículo marcha en vacío o con poca carga.

2.2.3 Efectos de un elemento de flexibilidad variable

Se ha visto que las oscilaciones de la suspensión aumentan y disminuyen en función de la carga y el grado de dureza de los muelles. Por tanto, si se mantiene la oscilación constante, se conseguirá una suspensión que se acerca a la ideal.

Para ello se tiene que colocar un elemento de unión cuya flexibilidad sea variable, de modo que, al aumentar la carga, aumente asimismo su rigidez para mantener constante la deformación.

Esto es muy difícil de conseguir con resortes metálicos; por tanto, las suspensiones basadas en este tipo de elementos (ballestas, muelles, barras de torsión, etc.) necesitan llevar acoplado un sistema amortiguador de oscilaciones que recoja la energía mecánica producida y evite su transmisión a la carrocería.

En las suspensiones neumáticas o hidroneumáticas se consigue la flexibilidad variable aumentando o disminuyendo la presión interna en sus elementos, como se verá al estudiar estos sistemas.

2.3. Componentes de la suspensión

El sistema de suspensión está compuesto por un elemento flexible o elástico (muelle de ballesta o helicoidal, barra de torsión, muelle de goma, gas o aire) y un elemento de amortiguación (amortiguador), cuya misión es neutralizar las oscilaciones de la masa suspendida originadas por el elemento flexible al adaptarse a las irregularidades del terreno [5], [6], [7].

2.3.1 Elementos de suspensión simples

En las suspensiones simples se utilizan como elementos de unión unos resortes de acero elástico en forma de ballesta, muelle helicoidal o barras de torsión.

Estos elementos, como todos los muelles, tienen excelentes propiedades elásticas pero poca capacidad de absorción de energía mecánica, por lo que no pueden ser montados solos en la suspensión; necesitan el montaje de un elemento que frene las oscilaciones producidas en su deformación. Debido a esto, los resortes se montan siempre con un amortiguador de doble efecto que frene tanto su compresión como expansión.

2.3.1.1 Ballestas

Las ballestas están constituidas (figura 2.6) por un conjunto de hojas o láminas de acero especial para muelles, unidas mediante unas abrazaderas (2) que permiten el deslizamiento entre las hojas cuando estas se deforman por el peso que soportan. La hoja superior (1), llamada hoja maestra, va curvada en sus extremos formando unos ojos en los que se montan unos casquillos de bronce (3) para su acoplamiento al soporte del bastidor por medio de unos pernos o bulones.

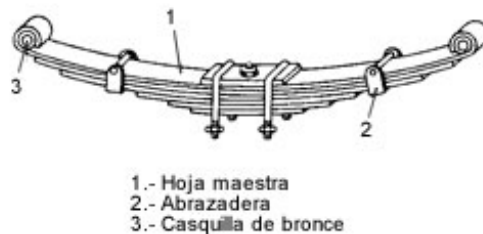


Figura 2.6 Ballesta.

El número de hojas y el espesor de las mismas están en función de la carga que han de soportar. Funcionan como los muelles de suspensión, haciendo de enlace entre el eje de las ruedas y el bastidor.

En algunos vehículos, sobre todo en camiones, además de servir de elementos de empuje, absorben con su deformación longitudinal la reacción en la propulsión.

2.3.1.2 Muelles helicoidales

Los muelles helicoidales mecánicos (figura 2.7) se utilizan modernamente en casi todos los turismos en sustitución de las ballestas, pues tienen la ventaja de conseguir una elasticidad blanda debido al gran recorrido del resorte sin apenas ocupar espacio ni sumar peso.



Figura 2.7 Muelles helicoidales.

Estos muelles consisten en un arrollamiento helicoidal de acero elástico formado por un hilo de diámetro variable (de 10 a 15 mm). Este diámetro varía en función de la carga que tienen que soportar. Las últimas espiras son planas para facilitar el asiento del muelle sobre sus bases de apoyo.

2.3.1.2.1 Características

Los muelles helicoidales no pueden transmitir esfuerzos laterales, y requieren, por tanto, en su montaje bielas de empuje lateral y transversal para la absorción de las reacciones de la rueda. Trabajan a torsión, retorciéndose proporcionalmente al esfuerzo que tienen que soportar, acortando su longitud y volviendo a su posición de reposo cuando cesa el efecto que produce la deformación.

La flexibilidad de los muelles está en función del número de espiras, del diámetro del resorte, del paso entre espiras, del espesor o diámetro del hilo, y de las características del material. Se puede conseguir muelles con una flexibilidad progresiva por medio de muelles helicoidales cónicos (figura 2.8), de muelles con paso entre espiras variable o disponiendo de muelles adicionales.



Figura 2.8 Tipos de muelles.

En la figura 2.9 puede apreciarse de forma gráfica las tres posiciones del muelle: sin montar, montado en el vehículo y el muelle bajo la acción de la carga.

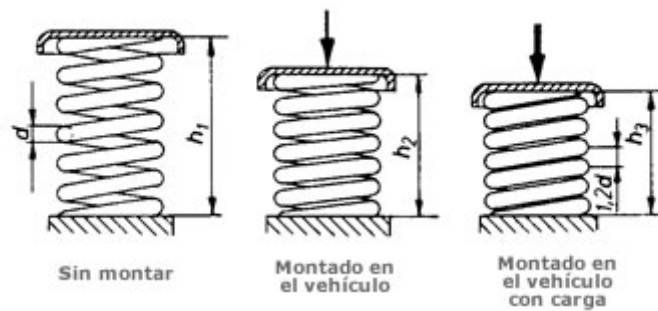


Figura 2.9 Posiciones del muelle.

Las espiras de un muelle helicoidal no deben, en su función elástica, hacer contacto entre sus espiras; es decir, que la deformación tiene que ser menor que el paso del muelle por el número de espiras. De ocurrir lo contrario, cesa el efecto del muelle y entonces las sacudidas por la marcha del vehículo se transmiten de forma directa al chasis.

2.3.1.3 Barra de torsión

La barra de torsión es utilizada en algunos turismos con suspensión independiente. Su funcionamiento está basado en el principio de que si a una varilla de acero elástico sujeta por uno de sus extremos se le aplica por el otro un esfuerzo de torsión, esta varilla tenderá a retorcerse, volviendo a su forma primitiva por su elasticidad cuando cesa el esfuerzo de torsión, como se muestra en la figura 2.10.



Figura 2.10 Barra de torsión.

El montaje de estas barras sobre el vehículo se realiza fijando uno de sus extremos al chasis o carrocería, de forma que no pueda girar en su soporte, y en el otro extremo se coloca una palanca solidaria a la barra unida en su extremo libre al eje de la rueda. Cuando esta sube o baja por efecto de las desigualdades del terreno, se produce en la barra un esfuerzo de torsión cuya deformación elástica permite el movimiento de la rueda.

Las barras de torsión se pueden disponer paralelamente al eje longitudinal del bastidor o también transversalmente a lo largo del bastidor.

En vehículos con motor y tracción delanteros, se montan una disposición mixta con las barras de torsión situadas longitudinalmente para la suspensión delantera y transversalmente para la suspensión trasera.

2.3.2 Barras estabilizadoras

Cuando un vehículo toma una curva, por la acción de la fuerza centrífuga se carga el peso del coche sobre las ruedas exteriores, con lo que la carrocería tiende a inclinarse hacia ese lado con peligro de vuelco y la correspondiente molestia para sus ocupantes.

Para evitar estos inconvenientes se montan sobre los ejes delantero y trasero las barras estabilizadoras (figura 2.11), que consisten esencialmente en una barra de acero elástico cuyos extremos se fijan a los soportes de suspensión de las ruedas. De esta forma, al tomar una curva, como una de las ruedas tiende a bajar y la otra a subir, se crea un par de torsión en la barra que absorbe el esfuerzo y se opone a que esto ocurra, e impide, por tanto, que la carrocería se incline a un lado, manteniéndola estable. El mismo efecto se produce cuando una de las ruedas encuentra un bache u obstáculo, creando, al bajar o subir la rueda, un par de torsión en la barra que hace que la carrocería se mantenga en posición horizontal. En caso de circular en línea recta y en condiciones normales, la acción de la barra es nula.

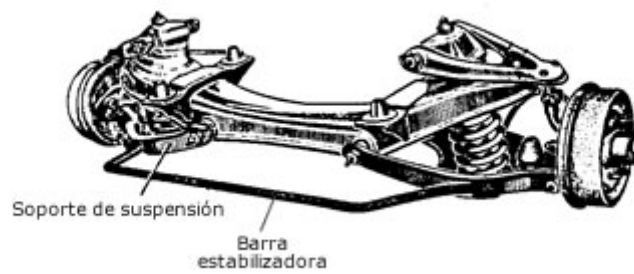


Figura 2.11 Montaje barra estabilizadora.

2.3.3 Silentblocks y cojinetes elásticos

Los *silentblocks* y los cojinetes elásticos son aislantes de caucho u otro material elastómero que se encargan de amortiguar las reacciones en los apoyos de la suspensión. Su misión es amortiguar los golpes existentes entre dos elementos en los que existe movimiento. Suelen montarse a presión o atornillados. Su sustitución debe realizarse cuando el caucho está deteriorado o existe holgura en la unión.

Los cojinetes elásticos son elementos de caucho que permiten la unión de los componentes de la suspensión facilitando un pequeño desplazamiento. Su montaje suele realizarse mediante bridas o casquillos elásticos. Estos cojinetes son muy utilizados para el montaje de las barras estabilizadoras.

2.3.4 Rótulas

Las rótulas, figura 2.12, constituyen un elemento de unión y fijación de la suspensión y de la dirección, que permite su pivotamiento y giro manteniendo la geometría de las ruedas.



Figura 2.12 Rótula.

La fijación de las rótulas se realiza mediante tornillos o roscados exteriores o interiores. Su sustitución debe realizarse si existe en estas algún daño como por ejemplo, si están deformadas a causa de algún golpe, o cuando existen holguras.

2.3.5 Mangueta y buje

La mangueta de la suspensión es una pieza fabricada con acero o aleaciones que une el buje de la rueda y la rueda a los elementos de la suspensión, tirantes, trapecios, amortiguador, etc.

La mangueta se diseña teniendo en cuenta las características geométricas del vehículo. En el interior del buje se montan los rodamientos o cojinetes que garantizan el giro de la rueda.

2.3.6 Trapecios o brazos de suspensión

Los brazos de suspensión son brazos articulados fabricados en fundición o en chapa de acero embutida que soportan al vehículo a través de la suspensión. Unen la mangueta y su buje mediante elementos elásticos (*silentblocks*) y elementos de guiado (rótulas) al vehículo, como se muestra en la figura 2.13, soportando los esfuerzos generados por éste en su funcionamiento.

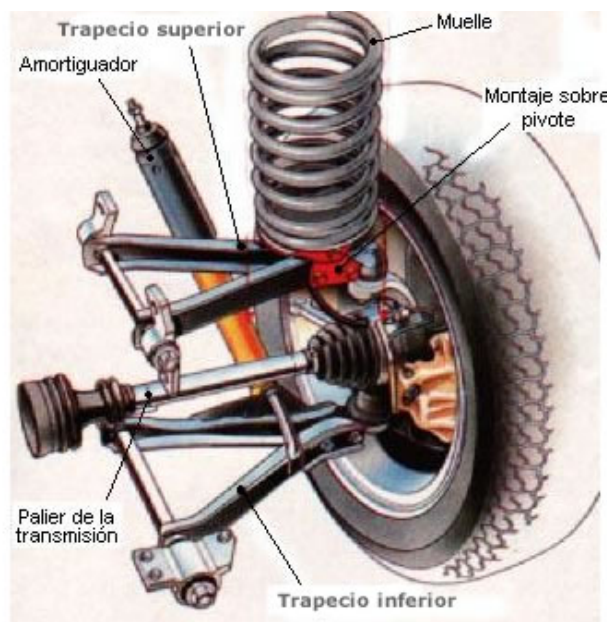


Figura 2.13 Montaje trapecios superior e inferior.

2.3.7 Tirantes de suspensión

Los tirantes de suspensión son brazos de acero longitudinales o transversales situados entre la carrocería y la mangueta o trapecio que sirven como sujeción de estos y facilitan su guiado. Absorben los desplazamientos y esfuerzos de los elementos de la suspensión a través de los *silentblocks* o cojinetes elásticos montados en sus extremos.

2.3.8 Topes de suspensión

Los topes de suspensión pueden ser elásticos o semi-rígidos en forma de taco o en forma de casquillo. Su función es servir de tope para el conjunto de la suspensión, de manera que en una compresión excesiva esta no se detiene. El montaje de este elemento es muy diverso dependiendo de la forma del taco. Por ejemplo, en las suspensiones McPherson se monta en el interior del vástago del amortiguador, mientras que en las suspensiones por ballesta se suele montar anclado en la carrocería.

2.3.9 Amortiguadores

Los amortiguadores son los encargados de absorber las vibraciones de los elementos elásticos (muelles, ballestas, barras de torsión), convirtiendo en calor la energía generada por las oscilaciones. En la figura 2.14 puede verse un ejemplo de amortiguador.



Figura 2.14 Amortiguador.

Cuando la rueda encuentra un obstáculo o bache, el muelle se comprime o se estira, recogiendo la energía mecánica producida por el choque, energía que devuelve a continuación, por efecto de su elasticidad, rebotando sobre la carrocería. Este rebote en forma de vibración es el que tiene que frenar el amortiguador, recogiendo, en primer lugar, el efecto de compresión y luego el de reacción del muelle, actuando de freno en ambos sentidos; por esta razón reciben el nombre de amortiguadores de doble efecto.

Los amortiguadores pueden ser “fijos” y “regulables”, los primeros tienen siempre la misma dureza y los segundos pueden variarla dentro de unos márgenes. En los más modernos modelos este reglaje se puede hacer incluso desde el interior del vehículo.

2.4. Tipos de suspensión mecánica

Según el tipo de elementos empleados y la forma del montaje de los mismos, existen varios sistemas de suspensión, todos ellos basados en el mismo principio de funcionamiento. Constan de un sistema elástico, amortiguación y barra estabilizadora independientes para cada uno de los ejes del vehículo [5], [8].

Actualmente existen distintas disposiciones de suspensión cuyo uso depende del tipo de comportamiento que se busca en el vehículo: mayores prestaciones, más comodidad, sencillez y economía.

Las suspensiones mecánicas se pueden clasificar en tres grupos: rígidas, semi-rígidas e independientes.

2.4.1 Suspensiones rígidas

Las suspensiones rígidas están formadas por un “eje rígido” en cuyos extremos se montan las ruedas. Como consecuencia de ello, todo el movimiento que afecta a una rueda se transmite a la otra del mismo eje. En la figura 2.15 se puede ver como al elevarse una rueda, se extiende su inclinación al eje y de este a la otra rueda. Como el eje va fijado directamente sobre el bastidor, la inclinación se transmite a todo el vehículo.

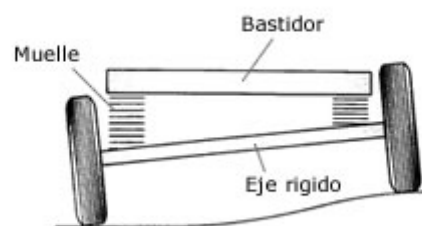


Figura 2.15 Suspensión rígida.

Este montaje es muy resistente y económico de fabricar, pero tiene la desventaja de ser poco cómodo para los pasajeros y una menor seguridad. El principal uso de esta disposición de suspensión se realiza sobre todo en vehículos industriales, autobuses, camiones y vehículos todoterreno.

En la figura 2.16 se muestra un modelo de eje rígido actuando de eje propulsor. En estos casos el eje está constituido por una caja que contiene el mecanismo diferencial (1) y por los tubos (3) que contienen los palieres. El eje rígido en este caso se apoya contra el bastidor mediante ballestas (2) que hacen de elemento elástico transmitiendo las oscilaciones. Completan el conjunto los amortiguadores (4).

Además para estabilizar el eje y generar un único centro de balanceo de la suspensión, se añade una barra transversal que une el eje con el bastidor. A esta barra se le conoce con el nombre de barra “Panhard”, que se muestra en la figura 2.17. Tanto las barras longitudinales como la barra Panhard dispone de articulaciones elásticas que las unen con el eje y la carrocería.

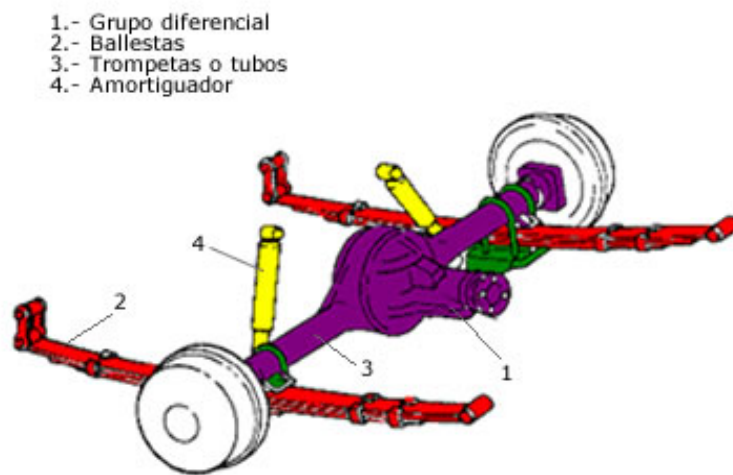


Figura 2.16 Suspensión rígida para eje trasero propulsor.



Figura 2.17 Barra Panhard, incorporada en un vehículo todoterreno.

2.4.2 Suspensión semi-rígida

Las suspensiones semi-rígidas son muy parecidas a las anteriores. Su diferencia principal es que las ruedas están unidas entre sí como en el eje rígido pero transmitiendo de una forma parcial las oscilaciones que reciben de las irregularidades del terreno. En cualquier caso aunque la suspensión no es rígida total tampoco es independiente. La función motriz se separa de la función de suspensión y de guiado.

En la figura 2.18 se muestra una suspensión de este tipo. Se trata de una suspensión con eje “De Dion”. En ella las ruedas van unidas mediante soportes articulados (1) al grupo diferencial (2), que en la suspensión con eje De Dion es parte de la masa suspendida, es decir, va anclado al bastidor del automóvil. Bajo este aspecto se transmite el giro a las ruedas a través de dos semiejes (palieres) como en las suspensiones independientes. A su vez ambas ruedas están unidas entre sí mediante una traviesa o tubo De Dion (3) que las ancla de forma rígida permitiendo a la suspensión deslizamientos longitudinales. Este sistema tiene la ventaja, frente al eje rígido, que se disminuye la masa no suspendida debido al poco peso de la traviesa del eje De Dion y al anclaje del grupo diferencial al bastidor y mantiene los parámetros de la rueda prácticamente constantes, como los ejes rígidos gracias al anclaje rígido de la traviesa. La suspensión posee además elementos elásticos de tipo muelle helicoidal (4) y suele ir acompañada de brazos longitudinales que limitan los desplazamientos longitudinales.

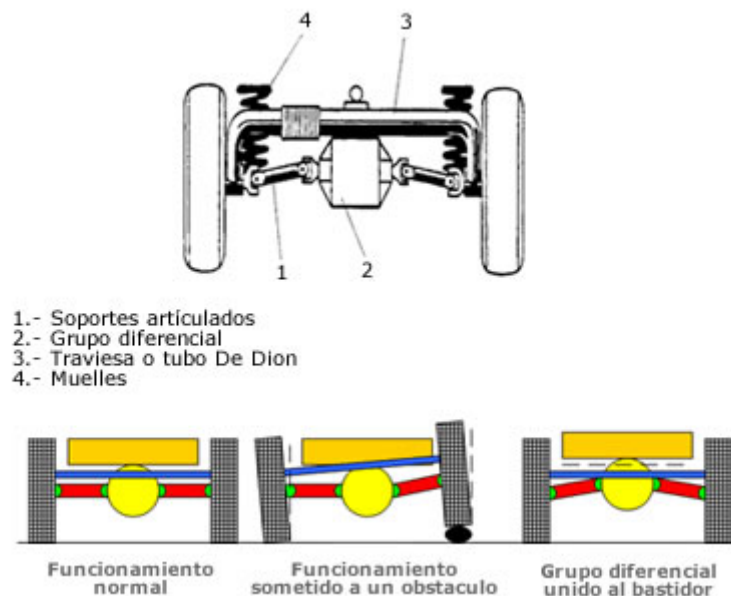


Figura 2.18 Esquema suspensión De Dion.

En la actualidad, hay pocos coches que incorporan esta suspensión debido a que su coste es elevado. Alfa Romeo es uno de los fabricantes que incorporó este sistema, más en concreto en el modelo 75. En la actualidad lo incorporan vehículos como el Honda HR-V y el Smart City Coupe.

2.4.3 Suspensión independiente

El sistema de suspensión independiente tiene un montaje elástico independiente que no está unido a otras ruedas, como se muestra en la figura 2.19. A diferencia del sistema rígido, el movimiento de una rueda no se transmite a la otra y la carrocería resulta menos afectada.

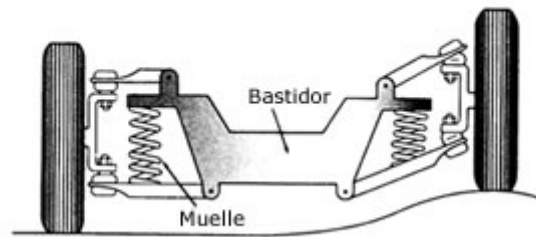


Figura 2.19 Suspensión independiente.

Actualmente, la suspensión independiente a las cuatro ruedas se va utilizando cada vez más debido a que es la más óptima desde el punto de vista de confort y estabilidad al reducir de forma independiente las oscilaciones generadas por el pavimento sin transmitirlas de una rueda a otra del mismo eje. La principal ventaja añadida de la suspensión independiente es que posee menor peso no suspendido que otros tipos de suspensión por lo que las acciones transmitidas al chasis son de menor magnitud. El diseño de este tipo de suspensión debe garantizar que las variaciones de caída de rueda y ancho de ruedas en las ruedas directrices tienen que ser pequeñas para conseguir una dirección segura del vehículo. Por el contrario, para cargas elevadas esta suspensión puede presentar problemas. Actualmente este tipo de suspensión es el único que se utiliza para las ruedas directrices.

El número de modelos de suspensión independiente es muy amplio y además posee numerosas variantes. Los principales tipos de suspensión de tipo independiente son:

- Suspensión de eje oscilante.
- Suspensión de brazos tirados.
- Suspensión McPherson.
- Suspensión de paralelogramo deformable.
- Suspensión multibrazo (*multilink*).

2.4.3.1 Suspensión de semieje oscilante

La peculiaridad de este sistema, que se muestra en la figura 2.20, es que el elemento de rodadura (1) y el semieje (2) son solidarios (salvo el giro de la rueda), de forma que el conjunto oscila alrededor de una articulación (3) próxima al plano medio longitudinal del vehículo. Este tipo de suspensión no se puede usar como eje directriz puesto que en

el movimiento oscilatorio de los semiejes se altera notablemente la caída de las ruedas en las curvas. Completan el sistema de suspensión dos conjuntos muelle-amortiguador telescópico (4).

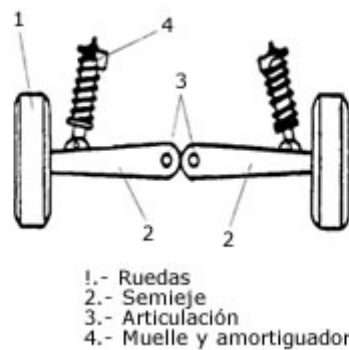


Figura 2.20 Esquema de una suspensión de eje oscilante.

Una variante de este sistema es el realizado mediante un eje oscilante pero de una sola articulación, mostrado en la figura 2.21. Esta suspensión es utilizada por Mercedes Benz en sus modelos 220 y 300. La ventaja que presenta es que el pivote de giro (1) está a menor altura que en el eje oscilante de las dos articulaciones. El mecanismo diferencial (2) oscila con uno de los palieres (3) mientras que el otro (4) se mueve a través de una articulación (6) que permite a su vez un desplazamiento de tipo axial en el árbol de transmisión. El sistema también cuenta con dos conjuntos muelle-amortiguador (7).

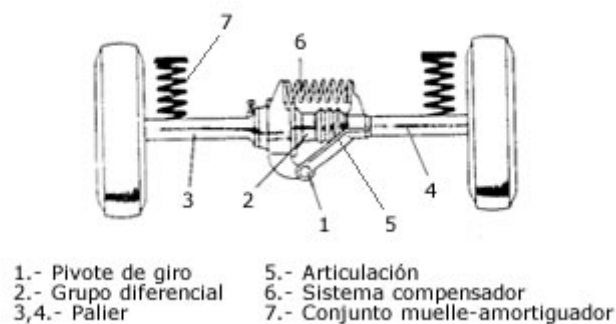


Figura 2.21 Esquema de eje oscilante y compensado.

2.4.3.2 Suspensión de brazos tirados o arrastrados

La suspensión de brazos triados o arrastrados se caracteriza por tener dos elementos soporte o “brazos” en disposición longitudinal que van unidos por un extremo al

bastidor y por el otro a la mangueta de la rueda. Si el eje es de tracción, el grupo diferencial va anclado al bastidor. En cualquier caso las ruedas son tiradas o arrastradas por los brazos longitudinales que pivotan en el anclaje de la carrocería.

Este sistema de suspensión ha dado un gran número de variantes cuyas diferencias estriban fundamentalmente en cuál es el eje de giro del brazo tirado en el anclaje al bastidor y cuál es el elemento elástico que utiliza.

En la figura 2.22 se muestra cómo los brazos tirados pueden pivotar de formas distintas: en la figura de la derecha los brazos longitudinales pivotan sobre un eje de giro perpendicular al plano longitudinal del vehículo. Este tipo de suspensión apenas produce variaciones de vía, caída o avance de la rueda. En la figura de la izquierda pivotan los brazos sobre ejes que tienen componentes longitudinales, es decir, sobre ejes oblicuos al plano longitudinal del vehículo. A esta última variante también se la conoce como “brazos semi-arrastrados” y tiene la ventaja de que no precisa estabilizadores longitudinales debido a la componente longitudinal que tiene el propio brazo o soporte. Aquí las variaciones de caída y de vía dependen de la posición e inclinación de los brazos longitudinales, por lo tanto, permite que se varíe durante la marcha la caída y el avance de las ruedas con lo que se mejora la estabilidad del vehículo. En cuanto al tipo de elementos elásticos que se utilizan en estas suspensiones, se encuentran las barras de torsión y los muelles.

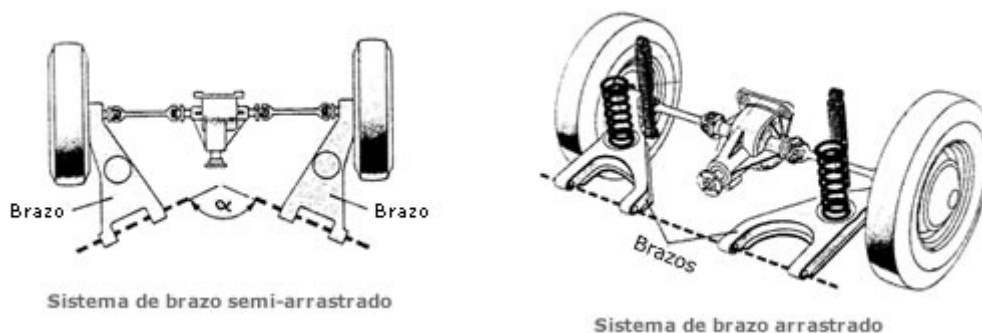


Figura 2.22 Sistema de brazo semi-arrastrado (derecha) y sistema de brazo arrastrado (izquierda).

2.4.3.3 Suspensión McPherson

La suspensión McPherson es uno de los sistemas más utilizados en el tren delantero aunque se puede montar igualmente en el trasero. Este sistema ha tenido mucho éxito, sobre todo en vehículos más modestos, por su sencillez de fabricación y mantenimiento, el coste de producción y el poco espacio que ocupa. En la figura 2.23 se muestra un esquema de la suspensión McPherson.

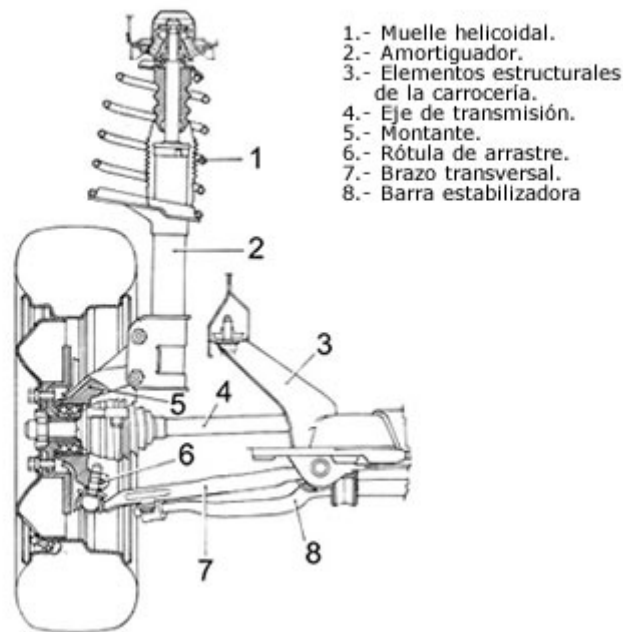


Figura 2.23 Esquema de un sistema de suspensión McPherson.

Con esta suspensión es imprescindible que la carrocería sea más resistente en los puntos donde se fijan los amortiguadores y muelles, con objeto de absorber los esfuerzos transmitidos por la suspensión.

La suspensión tipo McPherson forma un mecanismo de tipo triángulo articulado formado por el brazo inferior, el conjunto muelle-amortiguador y el propio chasis. El lado del triángulo que corresponde al muelle-amortiguador es de compresión libre por lo que sólo tiene un único grado de libertad: la tracción o compresión de los elementos elásticos y amortiguador. Al transmitirse a través del muelle-amortiguador todos los esfuerzos al chasis, es necesario un dimensionado más rígido de la carrocería en la zona de apoyo de la placa de fijación.

Como elementos complementarios a esta suspensión se encuentra la barra estabilizadora unida al brazo inferior mediante una bieleta y al bastidor mediante un casquillo, y en este caso un tirante de avance.

2.4.3.4 “Falsa” McPherson

Actualmente existen múltiples variantes en cuanto a la sustitución del tirante inferior que puede ser realizada por un triángulo inferior, doble bieleta transversal con tirante longitudinal, etc. A estos últimos sistemas también se les ha denominado “falsa” McPherson, aunque en cualquier caso todos ellos utilizan el amortiguador como elemento de guía y mantienen la estructura de triángulo articulado.

La suspensión clásica McPherson dispone de la barra estabilizadora como tirante longitudinal, mientras que las denominadas “falsa” McPherson ya absorben los

esfuerzos longitudinales con la propia disposición del anclaje del elemento que sustituye al brazo inferior.

2.4.3.5 Suspensión de paralelogramo deformable

La suspensión de paralelogramo deformable junto con la McPherson es la más utilizada en un gran número de automóviles tanto para el tren delantero como para el trasero. Esta suspensión también se denomina: suspensión por trapecio articulado y suspensión de triángulos superpuestos.

En la figura 2.24 se muestra una suspensión convencional de paralelogramo deformable. El paralelogramo está formado por un brazo superior (2) y otro inferior (1) que están unidos al chasis a través de unos pivotes, cerrando el paralelogramo a un lado el propio chasis y al otro la propia mangueta (7) de la rueda. La mangueta está articulada con los brazos mediante rótulas esféricas (4) que permiten la orientación de la rueda. Los elementos elásticos y amortiguador coaxiales (5) son de tipo resorte helicoidal e hidráulico telescópico respectivamente y están unidos por su parte inferior al brazo inferior y por su parte superior al bastidor. Completan el sistema unos topes (6) que evitan que el brazo inferior suba lo suficiente como para sobrepasar el límite elástico del muelle y un estabilizador lateral (8) que va anclado al brazo inferior (1).

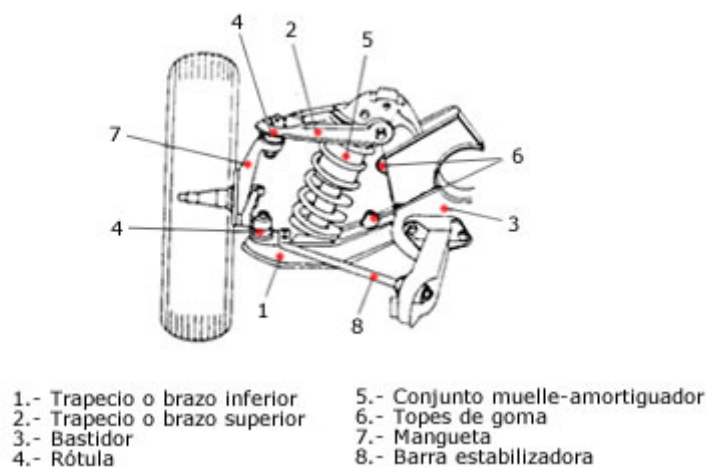


Figura 2.24 Suspensión de paralelogramo deformable.

Con distintas longitudes de los brazos (1) y (2) se pueden conseguir distintas geometrías de suspensión de forma que puede variar la estabilidad y la dirección según sea el diseño de estos tipos de suspensión.

La evolución de estos sistemas de suspensión de paralelogramo deformable ha llegado hasta las actuales suspensiones llamadas multibrazo o *multilink*.

2.4.3.6 Suspensiones Multibrazo o Multilink

Las suspensiones multibrazo se basan en el mismo concepto básico que sus precursoras, las suspensiones de paralelogramo deformable, es decir, el paralelogramo está formado por dos brazos transversales, la mangueta de la rueda y el propio bastidor. La diferencia fundamental que aportan estas nuevas suspensiones es que los elementos guía de la suspensión multibrazo pueden tener anclajes elásticos mediante manguitos de goma. Gracias a esta variante las multibrazo permiten modificar tanto los parámetros fundamentales de la rueda, como la caída o la convergencia, de la forma más apropiada de cara a la estabilidad en las distintas situaciones de uso del automóvil. Esto significa que las dinámicas longitudinal y transversal pueden configurarse de forma precisa y prácticamente independiente entre sí, y que puede alcanzarse un grado máximo de estabilidad direccional y confort.

A principios de los años noventa se comenzó a instalar estos sistemas multibrazo en automóviles de serie ya dando buenos resultados aunque había reticencias para los ejes no motores. En la actualidad, las grandes berlinas adoptan este sistema en uno de los trenes o en ambos. Para que una suspensión se considere multibrazo debe estar formada al menos por tres brazos.

Las suspensiones multibrazo se pueden clasificar en dos grupos fundamentales:

- Suspensiones multibrazo con elementos de guía transversales u oblicuos con funcionamiento similar al de las suspensiones de paralelogramo deformable.
- Suspensiones multibrazo que además disponen de brazos de guía longitudinal con un funcionamiento que recuerda a los sistemas de suspensión de ruedas tiradas por brazos longitudinales.

En la figura 2.25 se muestra en la parte izquierda un sistema multibrazo delantero y en la derecha uno trasero de tipo paralelogramo deformable con tres brazos. La suspensión delantera consta de un brazo superior (1) que va unido a una mangueta (2) larga y curvada mediante un buje de articulación (A) y un brazo inferior transversal (3) que va unido a la mangueta por una rótula doble (B) y al bastidor por un casquillo (C) que aísla de las vibraciones. Cierra el paralelogramo deformable el propio bastidor como en cualquier suspensión de este tipo.

Esta suspensión dispone además de un tercer brazo (4) que hace de tirante longitudinal y que está unido al bastidor y mangueta de la misma forma que el brazo inferior transversal (3). La gran altura de la prolongación de la mangueta consigue una disminución de los cambios de convergencia de la rueda y un ángulo de avance negativo.

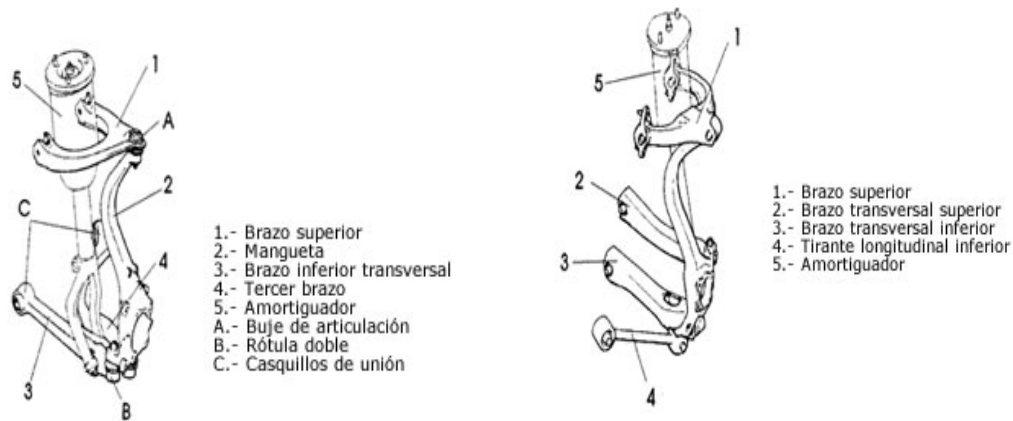


Figura 2.25 Esquema de una suspensión multibrazo delantera (izquierda) y trasera (derecha).

La suspensión trasera consta de un brazo superior (1) con forma de triángulo como la delantera, pero dispone de dos brazos transversales, superior (2) e inferior (3) y un tirante longitudinal inferior (4). Las articulaciones son similares al modelo de suspensión delantera.

Ambos sistemas poseen como elementos elásticos muelles helicoidales y amortiguadores telescópicos (5) y también barra estabilizadora. Se puede observar en la figura 2.25 que en la disposición delantera el amortiguador va anclado a la barra inferior transversal (3) mediante una horquilla.

2.5. Suspensiones regulables o pilotadas

La elección de tarado en una suspensión convencional o pasiva (las estudiadas anteriormente) supone un difícil compromiso entre el confort y la estabilidad del vehículo. En la figura 2.26 se muestra un esquema de la suspensión pasiva. Cuanto más dura sea la suspensión, aumentará la estabilidad del vehículo pero disminuirá el confort. Al contrario, con una suspensión blanda aumentará el confort pero disminuirá la estabilidad. Por esta razón, hay vehículos en los que por sus condiciones de utilización disponen de tarados blandos que absorben al máximo las oscilaciones de la carrocería debidas a las irregularidades del terreno y en cambio hay otros que por su conducción más deportiva optan por tarados duros que dotan al vehículo de una mayor estabilidad sobre todo en curvas y altas velocidades [1].

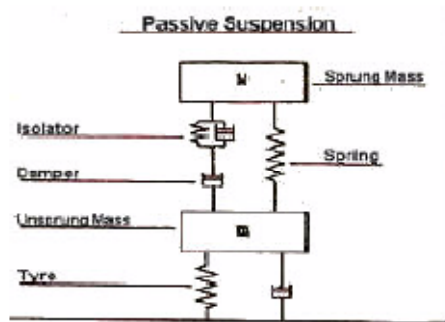


Figura 2.26 Esquema de una suspensión pasiva.

Lo ideal de una suspensión sería que se pueda adaptar a las condiciones del terreno o a las preferencias del conductor. Es por ello que actualmente están apareciendo infinidad de posibilidades de regulación. Así, la evolución de los sistemas de suspensión parece que va en la línea de los llamados sistemas “inteligentes”. Dentro de estos sistemas se pueden encontrar suspensiones activas o semiactivas.

2.5.1 Suspensiones activa

La suspensión activa surge como respuesta al inherente conflicto entre la fuerza que ejerce la rueda contra el suelo y el confort del vehículo. Este tipo de suspensión ofrece una solución tecnológicamente muy avanzada para conseguir solucionar este conflicto, consiguiendo además grandes niveles de control, maniobrabilidad y confort en un amplio rango de frecuencias. La principal desventaja de la suspensión activa es su elevado coste, principalmente para el control sobre altas frecuencias, cuya implementación resulta demasiado cara.

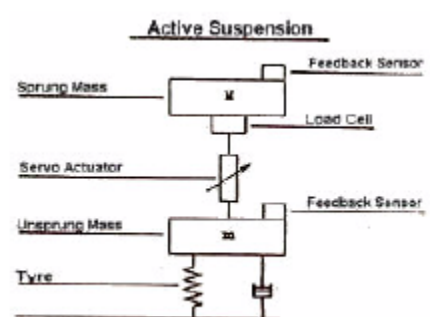


Figura 2.27 Esquema de las suspensiones activas.

Las suspensiones activas, cuyo esquema se muestra en la figura 2.27, constan de un actuador hidráulico, o neumático, que genera fuerzas para compensar el balanceo y cabeceo del vehículo, mientras que un ordenador electrónico se encarga de monitorizar constantemente (gracias a diversos sensores), el perfil de la carretera y envía señales

eléctricas a las suspensiones delantera y trasera. Aquí será donde los componentes hidráulicos, consistentes en bombas, actuadores y servoválvulas, actuarán manteniendo un nivel máximo de estabilidad.

El tiempo de respuesta indica el ancho de banda. Si este abarca un rango de frecuencias de hasta 3 ó 5 Hz el sistema de suspensión se denomina de baja frecuencia (Low Bandwith Systems), mientras que si el rango abarca frecuencias más elevadas, hasta 10 ó 12 Hz, se denomina de alta frecuencia (High Bandwith Systems). La suspensión activa puede controlar ambos rangos. Pero debido al coste que suponen y a la potencia que estos necesitan para funcionar (y que “roban” al motor, por tanto) se reduce a la competición (como Fórmula 1, hasta que fue prohibida en 1994).

Un ejemplo comercial lo constituye la suspensión CATS (Computer Active Technology Suspension) instalada en los modelos más deportivos de Jaguar como el XKR y el S-Type R, que utiliza tecnología de regulación electrónica adaptable para cambiar de un ajuste más suave a un tarado más firme dependiendo de la carretera y de las condiciones dinámicas de conducción. Puede variar la dureza del amortiguador en dos posiciones, de forma automática o manual. Lo curioso es que, en modo automático, la variación de dureza no es necesariamente simultánea en los cuatro amortiguadores. El sistema puede elegir qué amortiguadores endurece antes, para aumentar o disminuir el efecto de guiñada.

2.5.2 Suspensiones semiactivas

La suspensión semiactiva fue propuesta en la década de los 70 para solucionar los problemas de sobre coste que presentaban las suspensiones activas. Estas suspensiones incorporan elementos pasivos y activos para lograr optimizar el comportamiento del vehículo ante las irregularidades del terreno. En la figura 2.28 se muestra un esquema de suspensión semiactiva:

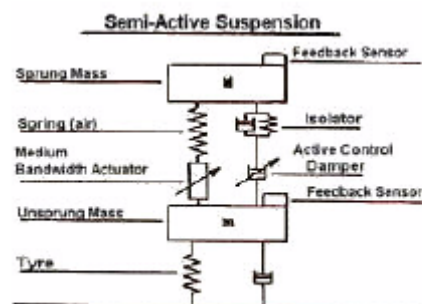


Figura 2.28 Esquema de las suspensiones semiactivas.

Las suspensiones semiactivas tratan de modificar la rigidez del muelle o bien del amortiguador mediante actuadores de baja potencia, normalmente de manera discreta en función de diferentes parámetros previamente monitorizados por sensores. Controlan las bajas frecuencias con elementos activos y las altas con pasivos. La diferencia estriba en

que éstas, a diferencia de las suspensiones activas, sí que emplean muelles convencionales.

Algunos sistemas de suspensión semiactiva incorporan amortiguadores hidráulicos, los cuales disponen de válvulas solenoides que cambian el diámetro de sus pasos permanentes, variando de esta manera el caudal del fluido. El inconveniente que presentan estos tipos de amortiguadores es que tienen un tiempo de respuesta (100-200 ms) superior al tiempo de muestreo del controlador por lo que la fuerza de control generada es diferente a la fuerza de control deseada. Para solucionar este problema, muchos investigadores están centrando su atención en sistemas de suspensión semiactiva basados en fluidos inteligentes cuyos tiempos de respuesta son rápidos como son los fluidos electro-reológicos y los magneto-reológicos (inferior a 25 ms). Dichos fluidos tienen la característica de cambiar sus propiedades viscosas de manera reversible cuando se encuentran bajo la acción de un campo eléctrico o magnético. Los fluidos electro-reológicos requieren ser alimentados con una tensión elevada mientras que los fluidos magneto-reológicos son excitados por un campo magnético por lo que requieren una menor tensión de alimentación. Asimismo, los fluidos magneto-reológicos generan mayores niveles de fuerza que los electro-reológicos y pueden trabajar en un rango mayor de temperaturas. Actualmente, este tipo de amortiguadores están siendo utilizados para mejorar el comportamiento de la suspensión en vehículos automóviles obteniendo muy buenos resultados.

3 El Amortiguador

3. EL AMORTIGUADOR

El amortiguador es un dispositivo que sirve para eliminar los efectos de oscilación producidos por el muelle. Al pasar por un bache, los resortes del sistema de suspensión almacenan una cierta cantidad de energía, que, posteriormente, restituyen a través de los balanceos [9]. De esta forma, los amortiguadores evitan que la carrocería del vehículo oscile continuamente (controlan los vaivenes transformando en calor la energía que acumula el muelle), disminuyen la variaciones de la carga dinámica de las ruedas y evitan que estas salten sobre el suelo, proporcionando comodidad y seguridad, principales objetivos de los sistemas de suspensión, como se justificó en el capítulo 2. Así, un amortiguador desgastado supone un grave peligro al permitir que las ruedas pierdan adherencia o capacidad de agarre con el asfalto. Por estas razón, un amortiguador desgastado supone un grave peligro al no evitar el rebote contra el pavimento y permitir de esta forma que las ruedas pierdan el contacto o la capacidad de agarre (adherencia) con el asfalto [10].

3.1 Función de los amortiguadores

La función de un amortiguador es la de frenar, parcial o totalmente, un movimiento no deseado que aparece de forma intencionada o no en un sistema mecánico. En particular, el amortiguador, en el ámbito del automóvil, no sólo debe amortiguar movimientos no deseados sino que debe hacerlo de forma óptima y según los criterios de maniobrabilidad y confort que se introducirán más adelante.

Lógicamente, para disminuir la velocidad de una masa se tiene que hacer una fuerza tal que se oponga a su velocidad. La fuerza más sencilla que cumple este requisito es la fricción y es esta fuerza en la que se basa el funcionamiento de los amortiguadores más comúnmente utilizados.

Se distinguen tres tipos de fricción: la fricción de Couloumb (asociada al movimiento relativo entre partes sólidas en contacto), la fricción asociada al movimiento viscoso de un fluido y la llamada fricción turbulenta que aparece a partir de la disipación energética como consecuencia del movimiento turbulento del fluido. En función del tipo de amortiguamiento deseado es conveniente buscar uno u otro tipo de fricción.

Por otra parte, es interesante que la fuerza que ofrece el amortiguador sea función de la velocidad, por lo que en los amortiguadores para automóviles, siempre se busca la fricción asociada al movimiento de un fluido ya que dicha fricción es función, entre otras variables, de la velocidad del fluido. Por el hecho de utilizar como medio un fluido, a este tipo de amortiguadores se los conoce como amortiguadores hidráulicos.

En los primeros vehículos automóviles no se utilizaba ningún tipo de suspensión y, realmente era innecesaria debido a que eran lentos y pesados. Rápidamente y a medida que los vehículos se volvieron más ligeros y rápidos, se percataron de que la falta de suspensión no sólo producía incomodidad sino que aparecían momentos en los que los neumáticos perdían el contacto con el suelo, perdiéndose tracción y estabilidad.

Teniendo presente que el neumático es el único elemento del vehículo en contacto con el suelo y, consecuentemente, es el único responsable del cambio cinemático del vehículo, se deduce que la principal función del sistema de suspensión es la de asegurar el contacto entre el neumático y el suelo.

En un segundo plano, la suspensión ha de proporcionar el máximo confort posible a los pasajeros y a la carga transportada.

El amortiguador, como parte integrante del sistema de suspensión, tiene la obligación de permitir y colaborar en la obtención del éxito de los requerimientos propuestos bajo cualquier situación.

3.2. Descripción del funcionamiento y partes del amortiguador

El principio de funcionamiento de los amortiguadores hidráulicos convencionales está basado en la conversión de energía cinética (movimiento) en energía térmica (calor) [11].

Si a un fluido que circula por un conducto se le pone una restricción, como por ejemplo, un orificio o un estrangulamiento, el fluido, el cual tenía una cierta presión y temperatura en la entrada, sale con una presión inferior y una temperatura superior. Además, es fácil ver que el fluido ejerce una fuerza sobre el orificio o estrangulamiento debido a la variación de presión que se ha generado.

En cualquier amortiguador hidráulico existe una parte móvil que desplaza un fluido (generalmente aceite) a través de unos orificios y/o válvulas que son las encargadas de producir una pérdida de carga. La fuerza de amortiguamiento es debida principalmente a la caída de presión generada en las válvulas, aunque influyen otros factores como la fuerza de fricción existente o la presión del gas.

El éxito en el funcionamiento de cualquier amortiguador es conseguir controlar la fuerza generada en función del movimiento impuesto sobre este, para poder optimizar el confort o la maniobrabilidad.

El efecto de pérdida de carga que tiene lugar dentro del amortiguador depende básicamente del caudal que circula a través de los orificios, y dicho caudal es, en teoría, directamente proporcional a la velocidad a la que se mueve el pistón relativo al cilindro de trabajo, por lo que la fuerza de amortiguamiento será función de la velocidad. Esta afirmación no es del todo cierta ya que existen ciertos diseños de amortiguadores modernos (como por ejemplo los Sensatrak de Monroe) en los que se procura que la fuerza de amortiguamiento sea también proporcional a la posición relativa entre el pistón y el cilindro con la intención de aumentar la fuerza de amortiguamiento cuanto más comprimido esté el amortiguador para conseguir una amortiguación más progresiva y obtener el máximo de confort para los viajeros.

3.2.1. Tipos de amortiguadores

Actualmente y desde hace unos años atrás se ha impuesto en la industria el uso de amortiguadores hidráulicos. En estos, la fuerza de amortiguación es función creciente con la velocidad [1].

Han existido distintos tipos de amortiguadores hidráulicos, como son los giratorios y los de pistón, pero apenas se emplean. Los que actualmente se utilizan son los de tipo telescópico, como el que se muestra en la figura 3.1, que son los que se van a describir con más detalle y a los que se hará mención de aquí en adelante.



Figura 3.1 Amortiguador hidráulico telescópico actual.

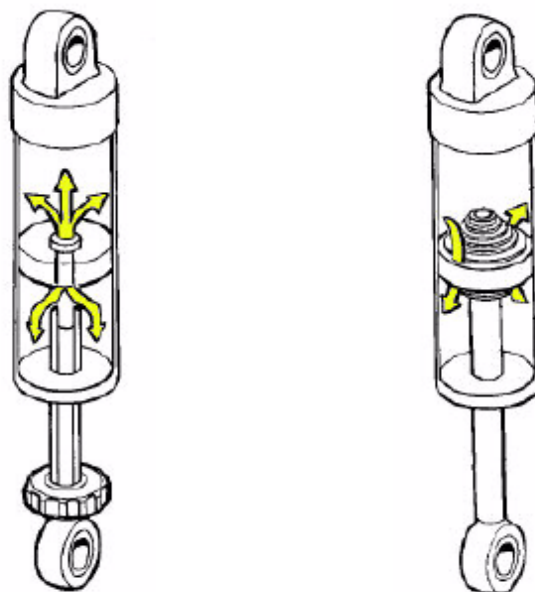


Figura 3.2 A la izquierda, flujo de aceite a través del paso permanente. A la derecha, flujo de aceite a través de las válvulas de apertura por presión.

Básicamente, los amortiguadores hidráulicos telescópicos constan de un pistón que trabaja dentro de un cilindro en el que hay aceite. Sobre el pistón existe una serie de orificios y unas válvulas precomprimidas que permiten el paso de aceite de una parte del

pistón a otra cuando la presión supera un valor dado. En la figura 3.2 se muestra un esquema del flujo de aceite.

El paso permanente vienen a ser orificios fijos (salvo cuando el amortiguador es un monotubo regulable, en cuyo caso la regulación suele consistir en la variación del tamaño de orificio) que restringen el flujo de caudal. En el caso de las válvulas de apertura por presión, para que éstas se abran es necesario ejercer sobre ellas una determinada presión y a medida que ésta aumenta la apertura va siendo mayor.

En la figura 3.3 se puede ver en detalle el pistón con los discos que componen las válvulas de apertura por presión y la aguja que regula el diámetro de la válvula de apertura por área cuando el amortiguador es variable. Si se mueve la rosca de ajuste de la dureza del amortiguador para “ablandarlo”, la aguja abrirá el orificio facilitando el paso del aceite y disminuyendo la rigidez del amortiguador y viceversa.

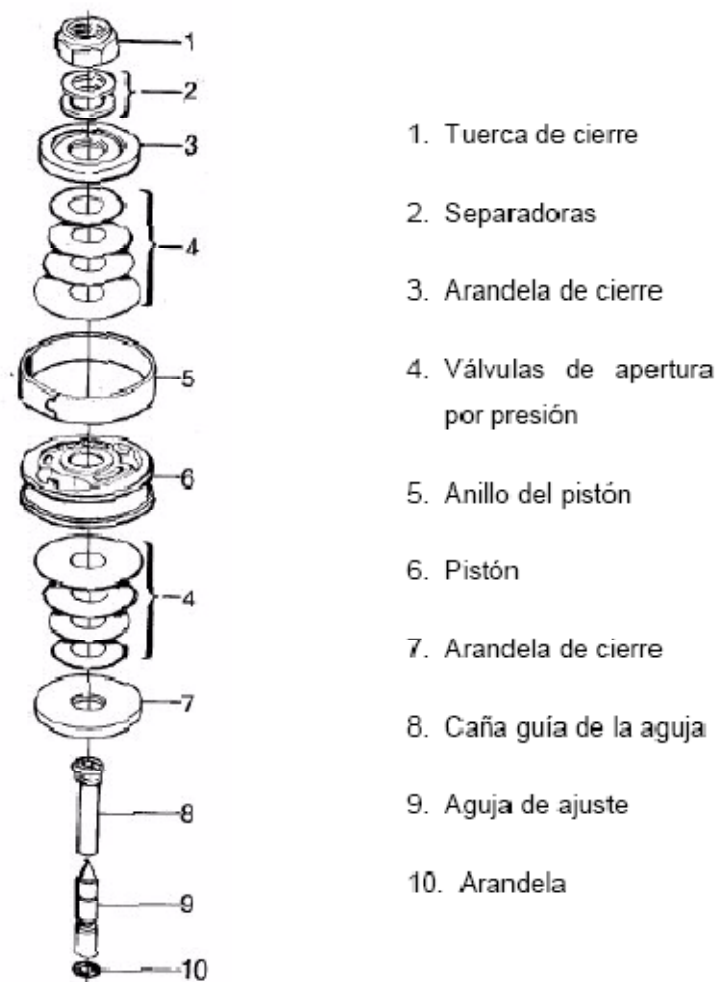


Figura 3.3 Explosión del pistón de un amortiguador monotubo.

Cuando la velocidad entre ambos extremos del amortiguador es baja, las válvulas de apertura por presión permanecen cerradas y el aceite pasa a través de los orificios de

paso permanente. Una vez la presión del aceite alcanza la del tarado de las válvulas de presión, estas empiezan a abrirse y dejan pasar el aceite. Cuanto más aumenta la presión, las válvulas se abren más hasta que su apertura es completa y la ley de la fuerza en el amortiguador queda controlada nuevamente por el paso del aceite a través del orificio de paso permanente.

Lo normal es que las válvulas de extensión y compresión sean diferentes, lo que posibilita que el esfuerzo en compresión sea menor para una misma velocidad. En los vehículos de carrera, interesa utilizar una característica de amortiguamiento más blanda en compresión (figura 3.4). Esto se hace para evitar la transmisión a través del amortiguador de las grandes fuerzas compresivas que se generan en el mismo cuando la rueda se encuentra con un obstáculo.

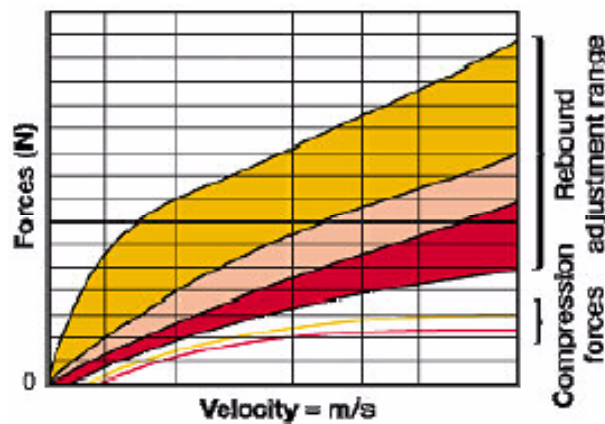


Figura 3.4 Diagrama fuerza velocidad de un amortiguador regulable.

Existen en el mercado fundamentalmente dos tipos de amortiguadores hidráulicos telescópicos: los de doble tubo o bitubo y los de un sólo tubo o monotubo.

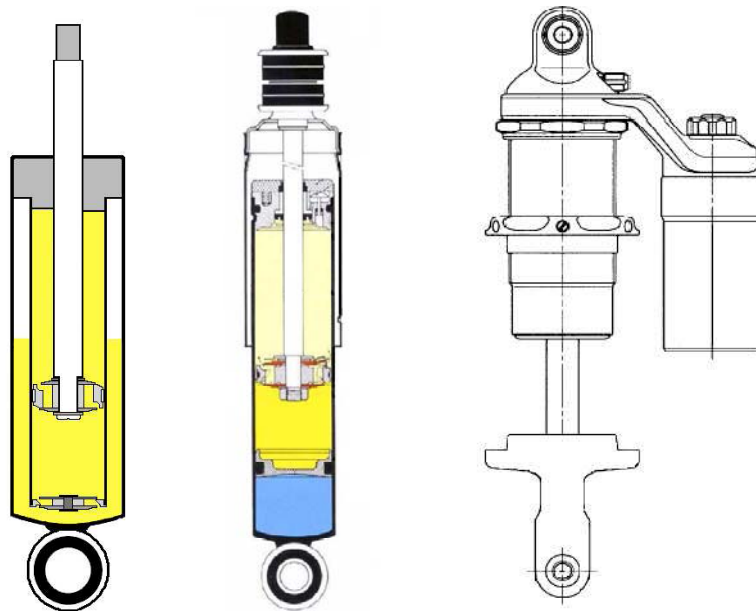


Figura 3.5 Amortiguador de doble tubo, monotubo y de depósitos separados.

3.2.1.1. Amortiguadores de doble tubo

Los amortiguadores de doble tubo son los más comunes en la actualidad. A su vez los hay de dos tipos: no presurizados (aceite) y presurizados (con aceite y gas). Constan de dos cámaras: una llamada interior y otra de reserva, como se muestra en la figura 3.6.

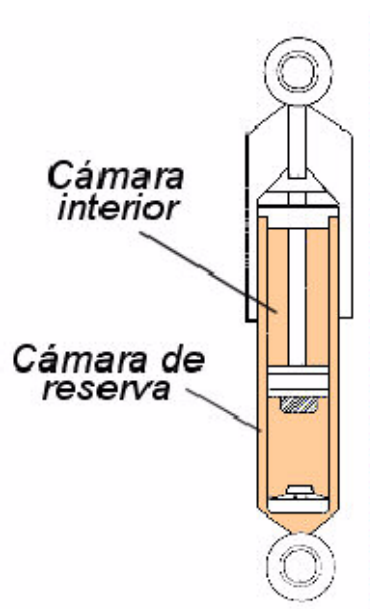


Figura 3.6 Esquema simplificado de un amortiguador bitubo.

Los componentes principales son los siguientes, los cuales se pueden ver en la figura 3.7:

- Tubo y cámara exterior o de reserva.
- Tubo o cámara interior o cilindro.
- Pistón acoplado al vástago.
- Válvula de pie.
- Guía del vástago.
- Acoplamientos superior e inferior.

El funcionamiento de ambos tipos es similar. En la carrera de compresión, cuando el vástago penetra, el aceite contenido en la cámara interior fluye sin resistencia a través de los orificios A, B, C y D y la válvula de no-retorno hacia el espacio generado al otro lado del pistón. Simultáneamente, una cierta cantidad de aceite se ve desplazada por el volumen que el vástago va ocupando en la cámara interior. Este aceite pasa forzosamente por la válvula de pie hacia la cámara de reserva (llena de aire a presión atmosférica o nitrógeno entre 4 y 8 bares). La fuerza de amortiguamiento viene dada por la resistencia que opone la válvula de pie al paso del aceite.

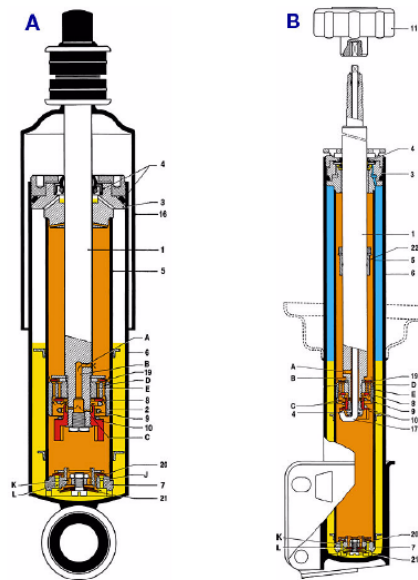


Figura 3.7 A la izquierda, esquema completo de un amortiguador bitubo no presurizado. A la derecha, esquema completo de un amortiguador bitubo presurizado.

En la carrera de extensión, al tirar del vástago hacia afuera el aceite que queda por encima del pistón se comprime y pasa a través de las válvulas que hay en él. La resistencia que el aceite encuentra en dichas válvulas es la fuerza de amortiguamiento de extensión. El aceite que había llegado a la cámara de reserva (6) vuelve sin hallar

resistencia por la válvula de pie a la cámara interior para compensar el volumen liberado por el vástago.

3.2.1.1.1 No presurizados

Los amortiguadores de doble tubo no presurizados tienen el inconveniente de que se pueden formar en ellos bolsas de aire bajo las siguientes condiciones:

- El amortiguador se almacena o transporta horizontal antes de ser instalado.
- La columna de aceite de la cámara principal cae por gravedad cuando el vehículo permanece quieto durante mucho tiempo.
- El aceite se contrae, consecuencia de su enfriamiento al final de un viaje, y se succiona aire hacia la cámara principal.

3.2.1.1.2. Presurizados

Los amortiguadores de doble tubo presurizados se emplean hoy en día en la mayoría de vehículos cuando se busca mejorar las prestaciones de los amortiguadores de doble tubo convencionales. La solución consiste en añadir una cámara de gas de baja presión. 4 bares es una presión suficiente, ya que la fuerza amortiguadora en compresión la sigue proporcionando la válvula de pie. De esta forma la fuerza de extensión realizada por el amortiguador en su posición normal es baja.

Sus ventajas con respecto a los no presurizados son las siguientes:

- Respuesta de las válvulas más sensible para pequeñas amplitudes.
- Mejor confort de marcha.
- Mejores propiedades de amortiguación en condiciones extremas (grandes baches).
- Reducción del ruido hidráulico.
- Siguen operativos aunque pierdan el gas.

Respecto a los amortiguadores monotubos, los de doble tubo presurizados tienen la ventaja de tener menor longitud y fricción para las mismas condiciones de operación.

3.2.1.2. Amortiguadores monotubo

De aparición más tardía que los bitubo, su uso está cada vez más extendido, sobre todo en vehículos de altas prestaciones y en competición. Constan de dos cámaras principales, una contiene el aceite y la otra gas a presión (normalmente nitrógeno) que están separadas por un pistón flotante. Solamente hay válvulas en el pistón. En la figura 3.8 se muestra un esquema simplificado de un amortiguador monotubo.

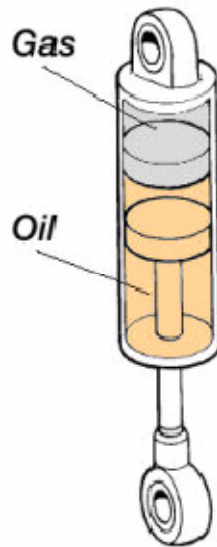


Figura 3.8 Esquema simplificado de un amortiguador monotubo.

Los componentes principales son los siguientes, los cuales se pueden ver en la figura 3.9:

- Tubo de presión.
- Pistón acoplado al vástago.
- Pistón flotante, también llamado pistón separador.
- Guía del vástago.
- Acoplamientos superior e inferior.

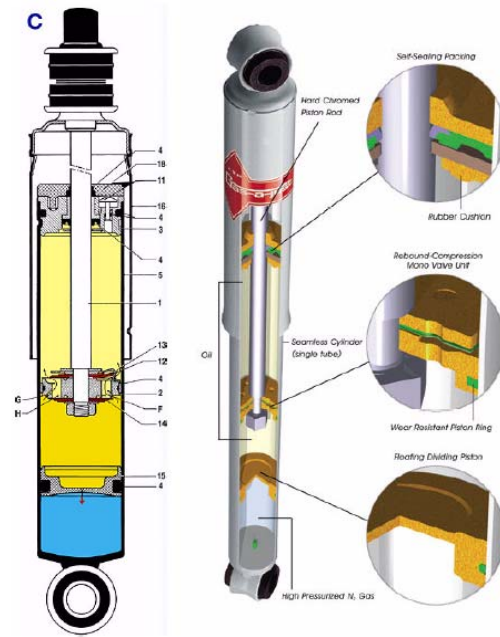


Figura 3.9 Esquema completo de un amortiguador monotubo.

En la carrera de compresión (figura 3.10), a diferencia del bitubo, el amortiguador monotubo no tiene cámara de reserva. El problema de ubicar el aceite que ocupa el espacio tomado por el vástago al penetrar se soluciona con una cámara de volumen variable. Mediante el pistón flotante se consigue dividir la cámara interior en dos zonas. Una la del aceite, y otra rellena de gas presurizado a una presión que oscila entre los 20 y 30 bares. Al ir el vástago hacia dentro, la presión que ejerce el aceite sobre dicho pistón flotante hace que la zona del gas se comprima, aumentando la presión en ambos lados (gas y aceite). Asimismo, el aceite se ve obligado a pasar a través de las válvulas del pistón. La fuerza de amortiguamiento viene dada por la resistencia que oponen dichas válvulas al paso del aceite.

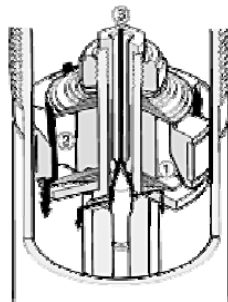


Figura 3.10 Flujo de aceite a través del pistón durante la carrera de compresión.

En la carrera de extensión (figura 3.11), al tirar del vástago hacia fuera el aceite que queda por encima del pistón, se comprime y pasa a través de las válvulas que hay en él. La resistencia que el aceite encuentra en dichas válvulas es la fuerza de

amortiguamiento de extensión. Por la disminución de presión en la cámara, el pistón flotante vuelve hacia arriba recobrando su posición original para compensar el volumen liberado por el vástago.

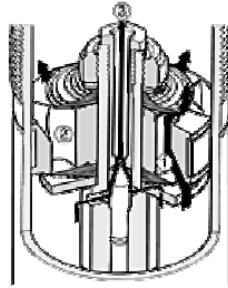


Figura 3.11 Flujo de aceite a través del pistón durante la carrera de extensión.

En la figura 3.11 se observa la división que se produce en el flujo del aceite según vaya por el paso permanente (3) o por las válvulas de apertura por presión (1) y (2).

Los amortiguadores monotubo presentan algunas ventajas con respecto a los bitubo no presurizados:

- Buena refrigeración debido a que la cámara está en contacto directo con el aire. Esto se traduce en una mayor eficacia, pues hay que tener en cuenta que el amortiguador es un dispositivo que convierte la energía cinética en energía calorífica.
- Mayor diámetro del pistón a igual diámetro de carcasa, lo que permite reducir presiones de operación.
- El nivel de aceite no baja al estar el vehículo estacionado, lo que evita funcionamientos deficientes a volver a arrancar.
- Debido a la presurización, el aceite no forma espuma, evitando problemas de cavitación y resultando un buen amortiguamiento incluso con pequeñas vibraciones de alta frecuencia.
- Gracias al pistón separador, no queda restringida la posición del montaje, pudiéndose colocar incluso tumbados.

Como desventajas se podrían citar las que siguen:

- Mayores costos derivados de requerimientos superiores de precisión, tolerancias de fabricación y estanqueidad del gas.
- La valvulería es más compleja.
- Su mayor necesidad de espacio puede aumentar su longitud por encima de 100 mm en aplicaciones a automóviles.

- Otra desventaja es la fuerza de extensión que realizan en su posición nominal, debido a la presión interna del gas y a la diferencia de áreas efectivas a ambos lados del pistón. Esta fuerza puede provocar variaciones en la altura de suspensión que es necesario considerar en su diseño.

3.3. Amortiguadores magneto-reológicos

Anteriormente se han analizado los tipos de amortiguadores que forman parte de la suspensión pasiva. Pero, como se ha visto en el capítulo 2, cada vez están tomando más importancia las suspensiones semiactivas, debido a su mejor capacidad de adaptación al terreno y a su menor tiempo de respuesta.

Los amortiguadores magneto-reológicos representan un caso particular de suspensión semiactiva y un avance relativamente reciente. Los primeros prototipos datan de principios de los 90, aunque General Motors presentó este sistema en el salón de Francfort de 1999.

Se trata de amortiguadores monotubo que en vez de aceite corriente llevan un fluido magneto-reológico, prescindiendo de válvulas electromecánicas. Este fluido está compuesto de un 40% aproximadamente de partículas metálicas flotando en él. Al magnetizarse, según si lo hace mucho o poco, modifica su viscosidad, consiguiéndose variar la dureza del amortiguador. La principal ventaja de este sistema frente a los tradicionales es la rapidez de variación del tipo de amortiguación, y las infinitas posibilidades de regulación que permite.



Figura 3.12 El Cadillac Seville STS está equipado con el sistema MagneRide de Delphi.

En la figura 3.12 se muestra un Cadillac Seville STS equipado con el sistema MagneRide de Delphi Automotive. Este sistema es la primera aplicación industrial de un fluido cuya viscosidad varía ante la presencia de un campo magnético. El fluido que utiliza el sistema MagneRide es una suspensión no coloidal, con partículas de hierro con

un tamaño de algunas micras en un hidrocarburo sintético. Sin la presencia de un campo magnético, las partículas de hierro están dispersas al azar en el seno del fluido. A medida que aumenta el campo magnético, se vuelve fibroso y su estructura llega a ser casi plástica.

Las reacciones del fluido al pasar por los orificios del amortiguador cambian con la diferencia de viscosidad. Cuando no está magnetizado, hay una gran diferencia de velocidad entre las partículas que están próximas a las paredes del orificio, y las que viven rodeadas de otras partículas de fluido (figura 3.13). Gracias a esa diferencia de velocidad, el caudal puede ser grande y, por tanto, el amortiguador es suave. Cuando el fluido está magnetizado, la velocidad de todas las partículas es muy semejante, el fluido es más lento y, por tanto, la dureza del amortiguador aumenta.

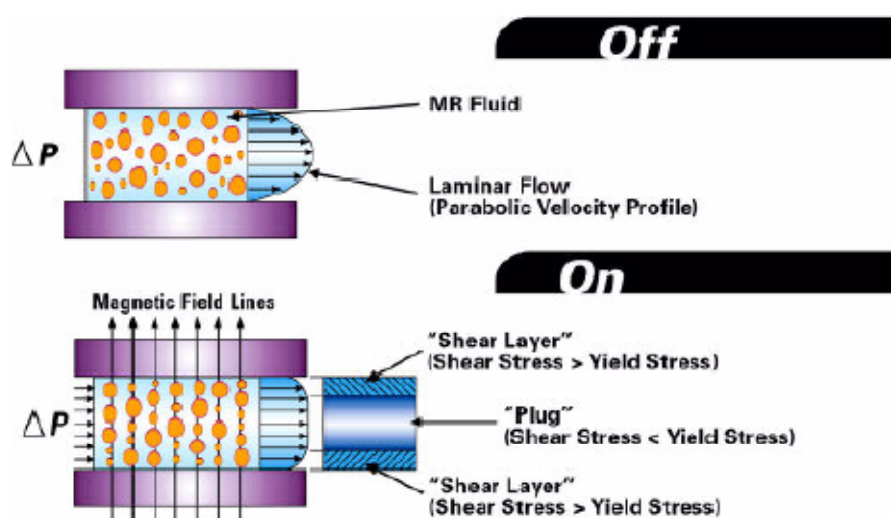


Figura 3.13 Magnetización del fluido del MagneRide.

La intensidad del campo magnético la ajusta una centralita, que recibe señales de cinco sensores (figura 3.14). Tres de ellos están ya en el control de estabilidad (ángulo de dirección, guiñada y aceleración transversal), otro es la velocidad del coche y otro la posición relativa de las ruedas. Delphi ha previsto que esta misma centralita puede controlar un sistema de altura constante.

Este sistema de suspensión variable sigue el mismo principio que una suspensión activa o semiactiva: suave cuando es posible y dura cuando es necesario. El amortiguador se endurece cuando es preciso limitar más los rebotes del muelle para aumentar el contacto con el suelo, bien por razones de estabilidad o bien por frenada.

También actúa para frenar movimientos como el balanceo o el cabeceo, aunque la amplitud de esos movimientos depende de los muelles y las estabilizadoras, no de los amortiguadores.

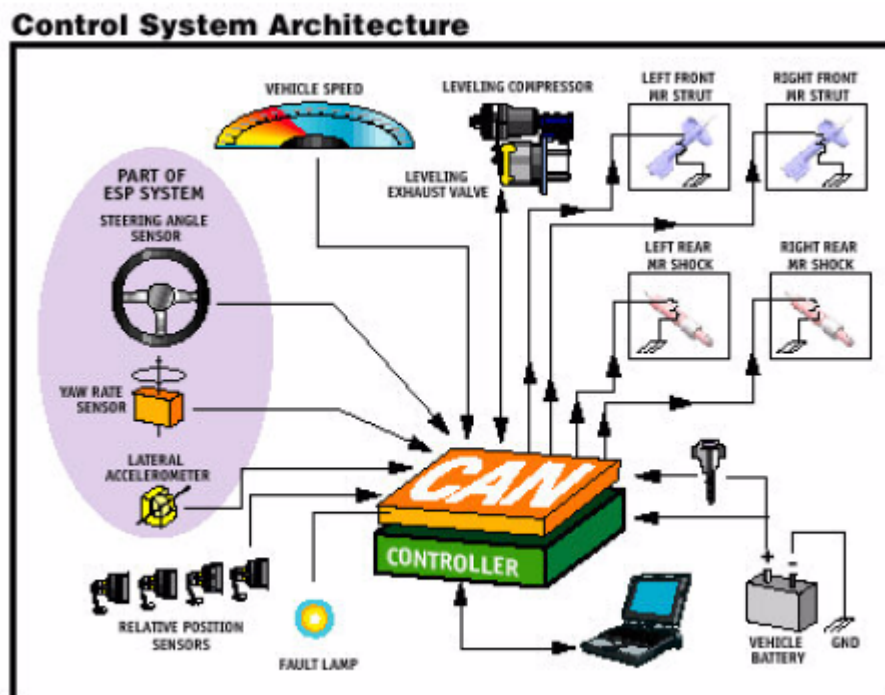


Figura 3.14 Esquema del sistema completo MagneRide.

4 Materiales Inteligentes

4. MATERIALES INTELIGENTES

Hoy en día, gracias a la popularidad que ha ido adquiriendo a lo largo de estos últimos años, el término “inteligente” se ha adoptado como un modo válido de calificar y describir una clase de materiales que presentan la capacidad de cambiar sus propiedades físicas (rigidez, viscosidad, forma, color, etc.) en presencia de un estímulo concreto [12].

No existe un consenso a la hora de aplicar este término a un material o estructura, pero sí existe un acuerdo en cuanto a ciertos criterios o rasgos comunes que deben presentar los llamados materiales o estructuras inteligentes:

- Estos materiales, de manera intrínseca o embebida, presentan sensores de reconocimiento y medida de la intensidad del estímulo ante el que reaccionará el material.
- A su vez presentan “actuadores”, embebidos o intrínsecos, que responden ante dicho estímulo.
- Para controlar la respuesta de una forma predeterminada presentan mecanismos de control y selección de la respuesta.
- El tiempo de respuesta es corto.
- El sistema regresa a su estado original tan pronto como el estímulo cesa.

Si se tienen en cuenta estos puntos genéricos, se podría adoptar como definición de sistema inteligente la siguiente: “Sistema o material que presenta sensores, actuadores y mecanismos de control, intrínsecos o embebidos, por los cuales es capaz de sentir un estímulo, de responder ante él de una forma predeterminada en un tiempo apropiado y de volver a su estado original tan pronto como el estímulo cesa”.

En la figura 4.1 se muestra un esquema de los tipos de materiales inteligentes que existen. En los siguientes apartados se describen brevemente los materiales inteligentes más habituales y conocidos [13].

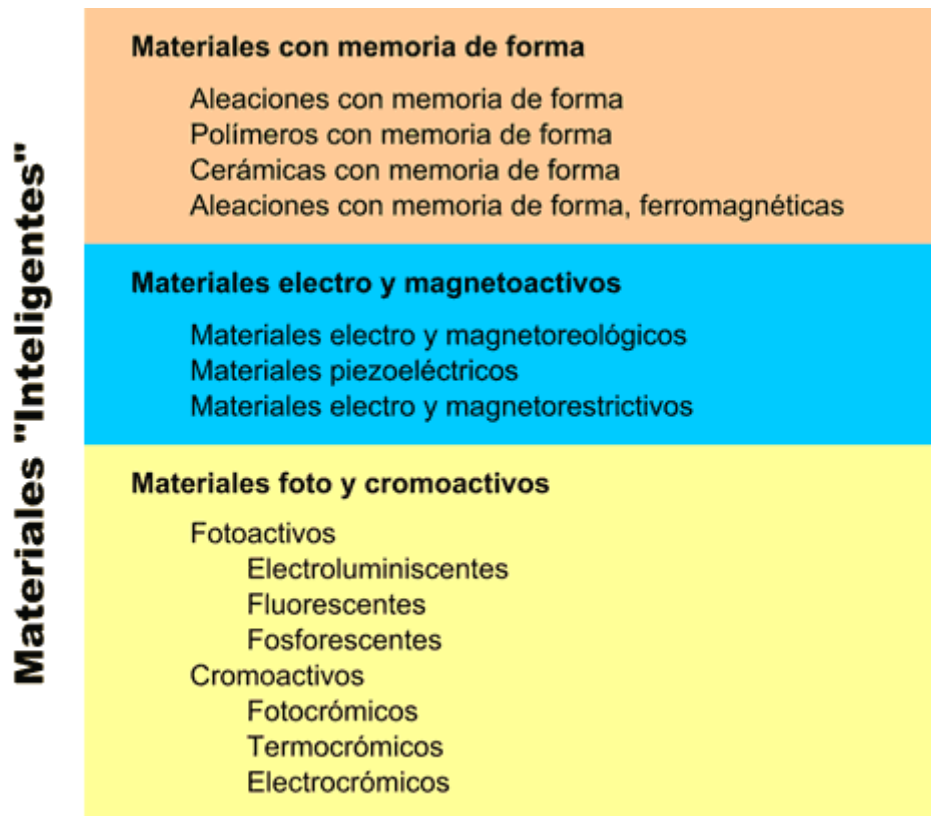


Figura 4.1 Materiales “inteligentes.”

4.1 Materiales con memoria de forma

El efecto de memoria de forma puede describirse como la capacidad de un material para cambiar la forma debido a la aplicación de un estímulo externo.

Bajo el término de materiales con memoria de forma existen cuatro clases diferentes, según la naturaleza, o del material en sí, o del estímulo externo al que responden. Las cuatro clases en las que se pueden dividir son:

- Aleaciones con Memoria de Forma (Shape Memory Alloys, SMAs).
- Cerámicas con Memoria de Forma (Shape Memory Ceramics, SMCs).
- Polímeros con Memoria de Forma (Shape Memory Polymers, SMPs).
- Aleaciones Ferromagnéticas con Memoria de Forma (Ferromagnetic Shape Memory Alloys, FSMAs).

En el caso de las aleaciones metálicas, el efecto de memoria de forma se basa en la transición que se produce entre dos fases sólidas, una de baja temperatura o martensítica

y otra de alta temperatura o austenítica. En la figura 4.2 se representa un esquema del efecto de memoria de forma.

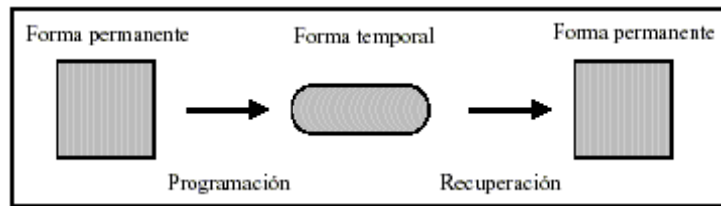


Figura 4.2 Representación esquemática del efecto de memoria de forma.

El material se deforma en la fase martensítica y recupera de forma reversible sus dimensiones originales mediante el calentamiento por encima de una temperatura crítica de transición. En la figura 4.3 puede verse el cambio en la estructura cristalina que se produce durante el cambio de fase en las aleaciones con memoria de forma.

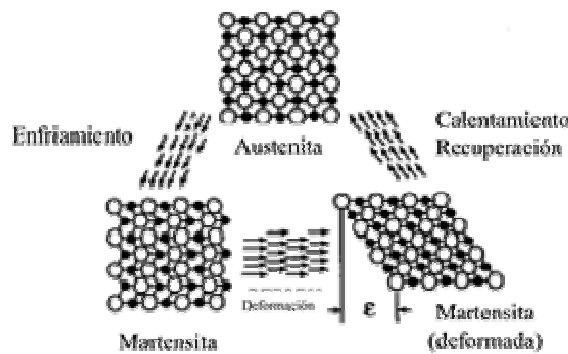


Figura 4.3 Cambio en la estructura cristalina que se produce durante el cambio de fase en las aleaciones con memoria de forma.

Por otro lado, los polímeros con memoria de forma son materiales poliméricos con la capacidad de recordar su forma original. Este efecto está relacionado con la combinación de la estructura y la morfología del polímero junto con el proceso y tecnología de programación de inclusión de la forma empleado. Es decir, es necesario un entrenamiento del material para que recuerde una forma determinada.

El primer paso es procesar el polímero para grabar su forma permanente y seguidamente el polímero es deformado fijándose, de ese modo, la forma temporal.

El mecanismo del efecto de memoria de forma en los polímeros puede producirse, no sólo por temperatura, sino también por luz o por reacciones químicas.

A parte de los metales y los polímeros, las cerámicas completan las tres grandes familias de materiales sólidos. Una definición general de cerámica podría ser la siguiente: materiales inorgánicos, no metálicos, que se producen habitualmente

empleando arcillas y otros minerales naturales o procesados químicamente. Estas cerámicas inteligentes, normalmente, son cerámicas basadas en ZrO_2 , pero existen otros ejemplos basados en niobato de magnesio o cerámicas perovskitas.

Por último, hay que mencionar la aparición de una nueva clase de materiales que sufren el efecto de memoria de forma bajo la aplicación de diferentes campos magnéticos y que presentan grandes elongaciones (aproximadamente de un 6 %).

En este caso, el comportamiento es similar al de las aleaciones con memoria de forma (SMAs) pero el estímulo al que responden, en vez de ser la temperatura, es el campo magnético aplicado. Estos materiales son conocidos como Aleaciones Ferromagnéticas con Memoria de Forma (FSMAs) o Metales Magnetoelásticos.

4.1.1 Materiales electro y magneto-activos

Los materiales electro y magneto-activos experimentan cambios en sus propiedades físicas ante la presencia o aplicación de un campo eléctrico o magnético. Estos fluidos presentan la capacidad de cambiar su viscosidad aparente en presencia de un estímulo externo. Se dividen en dos categorías dependiendo de la naturaleza del estímulo al que responden mediante un cambio en sus propiedades reológicas.

4.1.2 Materiales foto y cromo-activos.

Los materiales cromo-activos son aquellos en los que se producen cambios de color como consecuencia de algún fenómeno externo como puede ser la corriente eléctrica, radiación UV o temperatura.

Los materiales fotoactivos son aquellos en los que se producen cambios de diferente naturaleza como consecuencia de la acción de la luz o que son capaces de emitir luz como consecuencia de algún fenómeno externo.

Entre los materiales fotoactivos que emiten luz, sin que se produzca calor, destacan los electroluminiscentes, los fluorescentes y los fosforescentes.

- Electroluminiscentes: son materiales organometálicos basados fundamentalmente en fósforos y fluorocarbonos que emiten luz de diferentes colores cuando son estimulados por una corriente eléctrica.
- Fluorescentes: son materiales semiconductores que producen luz visible como resultado de su activación con luz UV. El efecto cesa tan pronto como desaparece la fuente de excitación. Los pigmentos fluorescentes a la luz del día son blancos o de color claro mientras que cuando están expuestos a radiación UV irradian un intenso color fluorescente.

- Fosforescentes: materiales semiconductores que convierten la energía absorbida en luz emitida sólo detectable en la oscuridad, después de que la fuente de excitación ha sido eliminada. Esta emisión de luz puede durar desde minutos hasta horas. La fuente de excitación más efectiva es la radiación UV [14].

4.1.3 Fluidos electro-reológicos y fluidos magneto-reológicos

Se llama efecto electro-reológico al cambio reversible de las propiedades reológicas de un fluido debido a la aplicación de un campo eléctrico. Estos fluidos suelen clasificarse en dos tipos, uno correspondiente a fluidos formados por partículas dispersas y, por otro lado los fluidos homogéneos. En el primer caso, el más común, se acepta que el origen de la respuesta electro-reológica es debido a la agregación de las partículas en suspensión provocada por la polarización de los materiales. Acerca de los fluidos homogéneos, estos se comportan de igual manera que los anteriores pero, gracias a la ausencia de partículas pueden llegar a ser de gran utilidad para la microtecnología, permitiendo mayores miniaturizaciones.

Por otro lado, los materiales cuyas propiedades reológicas pueden ser variadas mediante la aplicación de campos magnéticos son los denominados materiales magneto-reológicos. En general, un material magneto-reológico (MR) se compone de partículas micrométricas magnéticamente permeables suspendidas en un medio no magnético. Bajo el campo magnético se produce una polarización inducida sobre las partículas suspendidas de manera que se forman estructuras con forma de cadena debido a la interacción entre los diferentes dipolos inducidos.

Estas estructuras restringen la movilidad del fluido y consecuentemente se incrementa la viscosidad y se desarrolla una resistencia en la suspensión. Cuanto mayor sea el campo magnético aplicado mayor será la energía mecánica necesaria para romper dichas estructuras, es decir, se genera una resistencia dependiente del campo.

También existe otro tipo de materiales denominados sólidos magneto-reológicos, ya que la matriz en la que se dispersan las partículas férricas es una matriz polimérica sólida, como pueden ser materiales elastoméricos o espumas. Esta matriz, en principio, debe presentar un módulo de Young bajo ya que, de este modo, al presentar flexibilidad permiten cierto movimiento de las partículas férricas llegando a producirse alineamientos de las mismas y así aumentar su resistencia ante la cizalla o la compresión.

A su vez, dentro de los materiales electro-activos se encuentran los materiales piezoeléctricos. A modo de definición simple, el efecto piezoeléctrico es la capacidad que tiene un material para convertir la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Este efecto se da en ciertos materiales sólidos cristalinos cuyas celdas unidad no poseen centros de simetría (por ejemplo el cuarzo y diferentes cerámicas policristalinas sintéticas).

Existen materiales piezoeléctricos de naturaleza cerámica y polimérica, aunque estos últimos son más escasos y, en muchos casos, se encuentran todavía en fases de investigación y desarrollo. Dentro de estos últimos el más conocido es el polifluoruro de

vinilideno (PVDF), aunque estas propiedades piezoeléctricas también se han encontrado en el PVC, el polifluoruro de vinilo, en copolímeros de trifluoroetileno y PVDF, etc. todos ellos polímeros que contienen grupos polares con capacidad de orientarse a fin de generar dipolos internos en la estructura del material.

Por último, dentro de esta categoría de materiales electro y magneto-activos se encuentran los materiales electro-estrictivos y magneto-estrictivos. Los primeros exhiben un esfuerzo mecánico cuando están sometidos a un campo eléctrico sufriendo únicamente procesos de elongación, independientemente de la dirección en la que se aplique el campo eléctrico. En el caso de los magnetoestrictivos, se deforman bajo un campo magnético y generan un campo magnético cuando son sometidos a un esfuerzo mecánico.

4.2 Fluidos reológicos

Los fluidos reológicos son aquellos fluidos cuyas propiedades cambian ante la presencia de un campo eléctrico o magnético exterior. Los fluidos reológicos son líquidos inertes que portan partículas en suspensión. Estas partículas tienen un tamaño del orden de 5 μm y son habitualmente aceites de silicona o minerales.

Existen dos tipos de fluidos reológicos que pueden considerarse materiales activos. Se trata de los fluidos electro-reológicos y los magneto-reológicos. Ambos se basan en el mismo principio y solo se diferencian en que son sensibles a diferentes estímulos exteriores. El fluido electro-reológico cambia sus propiedades ante un campo eléctrico exterior mientras que el magneto-reológico lo hace ante un campo magnético.

Esta propiedad es consecuencia de la formación de estructuras dentro del fluido como respuesta a estímulos exteriores. A bajos esfuerzos esta formación de estructuras (agregados de partículas sólidas), domina el flujo del fluido y puede llegar a evitar la creación del mismo. En la figura 4.4 se muestra el efecto de la presencia de un campo magnético sobre el campo de velocidades de un fluido magneto-reológico [15].

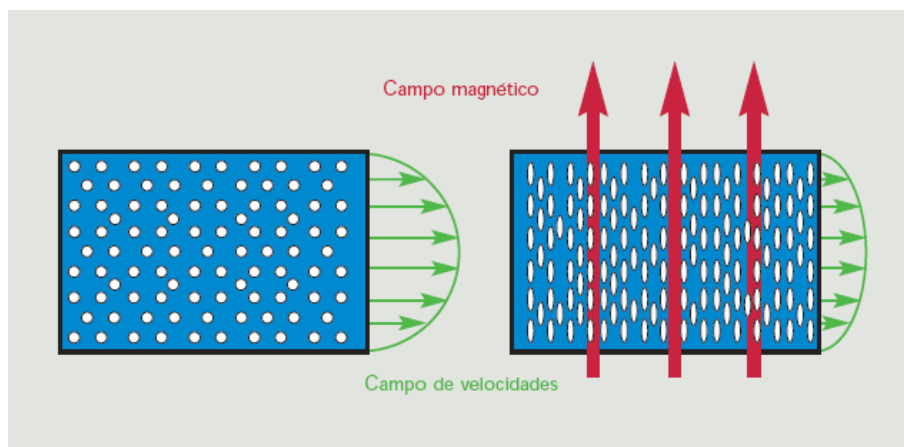


Figura 4.4 Fluido Magneto-reológico.

Cuando no existe un campo exterior, los fluidos reológicos pueden considerarse fluidos newtonianos. En esta condición se comportan como un fluido normal, es decir, ante una velocidad de deformación oponen un esfuerzo viscoso, que es proporcional a la velocidad de deformación a través de la viscosidad del fluido.

Cuando se aplica un campo exterior, las partículas en suspensión forman cadenas en la dirección del campo. En el caso en que el campo se aplica perpendicularmente a la dirección del flujo del fluido entonces estas cadenas se forman perpendicularmente al flujo y como consecuencia del propio flujo estas cadenas se rompen y deben ser otra vez formadas, de manera que la continua rotura y formación de cadenas da como resultado la aparición de un esfuerzo que se opone al propio movimiento, por lo que para producir el deslizamiento de las capas de fluido es necesario superar este esfuerzo llamado de fluencia. Ante esfuerzos inferiores al de fluencia el fluido reológico responde como un sólido viscoelástico.

La ventaja que presentan estos fluidos es que para conseguir una velocidad determinada es necesario un esfuerzo viscoso superior al que correspondería en el caso de un fluido ordinario, y este esfuerzo es controlable en función de la intensidad del campo exterior. Dicho aumento del esfuerzo viscoso no se debe al aumento de la viscosidad, sino que se produce porque el esfuerzo de fluencia aumenta con el valor del campo exterior (véase figura 4.5).

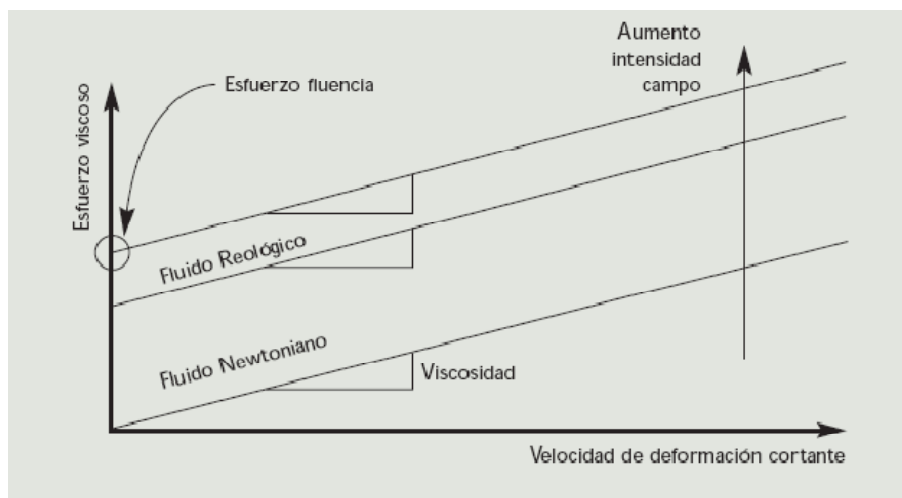


Figura 4.5 Curva característica de los fluidos reológicos.

El aumento de esfuerzo viscoso de estos fluidos los hace especialmente atractivos para aplicaciones relacionadas con el amortiguamiento y control activo de vibraciones. Y, en gran medida, los fluidos reológicos se han empleado como actuadores y especialmente en el control de vibraciones como, por ejemplo, en el desarrollo de amortiguadores, apoyos de motores y amortiguadores para palas de helicópteros.

En el caso del presente proyecto, interesa conocer en más detalle el fluido que modifica sus propiedades ante la presencia de un campo exterior de tipo magnético, por ello se entrará más en detalle en los fluidos magneto-reológicos.

4.3 Fluidos magneto-reológicos

Los fluidos magneto-reológicos son producidos suspendiendo microesferas de hierro al carbono u otras partículas magnetizables en un fluido base de hidrocarburo sintético. Más concretamente, los fluidos magneto-reológicos son suspensiones coloidales estables de partículas superparamagnéticas, cuyo diámetro está comprendido entre 100 nm y 10 μm , en agua o en algún disolvente inorgánico [16]. Dicho fluido presenta una distribución de partícula “bimodal” que incorpora dos tamaños de microesferas de hierro, grandes y pequeñas, distribuidas en proporciones óptimas, lo cual produce un fluido con un elevado límite elástico y baja viscosidad, propiedades requeridas para aplicaciones de amortiguamiento.

Un fluido magneto-reológico en el estado desmagnetizado (fluido en el estado OFF, figura 4.6) es una dispersión aleatoria de partículas, exhibiendo comportamiento reológico newtoniano (esfuerzo cortante = viscosidad x velocidad tangencial) [17].

Pero cuando el estado pasa a ser magnetizado (estado ON, figura 3.13), el fluido cambia su comportamiento reológico, actuando ahora como un plástico Bingham (esfuerzo cortante = límite elástico + viscosidad x velocidad tangencial).

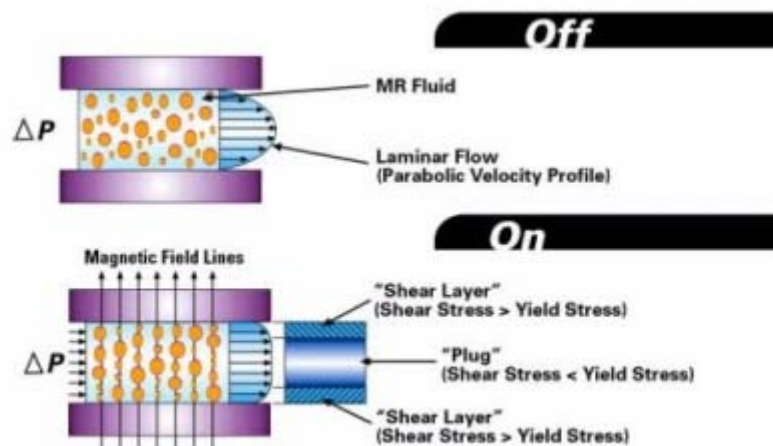


Figura 3.13 Magnetización del fluido del MagneRide.

En la figura 3.13 se muestra el comportamiento de ambos estados, ON y OFF, dentro de un amortiguador magneto-reológico [3]. El campo magnético aplicado, alinea las partículas metálicas “fibras”, controlando el límite elástico del fluido sin afectar a su viscosidad. El efecto magneto-reológico es muy rápido (tiempos de respuesta de menos de 20 milisegundos). El efecto es reversible, y no se ve influido por la temperatura.

Los amortiguadores magneto-reológicos tienen un elevado rango dinámico y una respuesta extremadamente rápida. La aproximación matemática requerida para el diseño

de los actuadores y la selección de los mejores fluidos magneto-reológicos proporcionan una ventaja competitiva frente a otros sistemas.

El comportamiento superior al de los actuadores, junto con los algoritmos de control desarrollados, proporciona beneficios a la conducción y a la maniobrabilidad sobre los sistemas de suspensión convencionales.

Este sistema, además, aumenta notablemente la seguridad, ya que las distancias de frenado pueden ser reducida y la estabilidad del vehículo puede ser mejorada durante el frenado gracias a un escaso rebote de la rueda y un gran aumento del tiempo y la superficie de contacto de la rueda con el asfalto [18].

4.4 Aplicaciones de los fluidos magneto-reológicos

Los ejemplos más corrientes, en cuanto al uso de fluidos magneto-reológicos se refiere, son: el uso de suspensiones de los vehículos, la protección sísmica, las prótesis médicas, los dispositivos de regeneración táctiles, las válvulas controlables y el uso en el sistema de frenos de los automóviles.

4.4.1 Suspensión de los asientos para vehículos de trabajo pesado.

La figura 4.7 muestra un amortiguador de fluido magneto-reológico diseñado para utilizarse en un sistema de suspensión de asiento semiactivo en vehículos de cargas para travesías largas [19].

Este amortiguador es capaz de proveer un amplio rango dinámico de control de fuerza para niveles modestos de potencia de entrada.

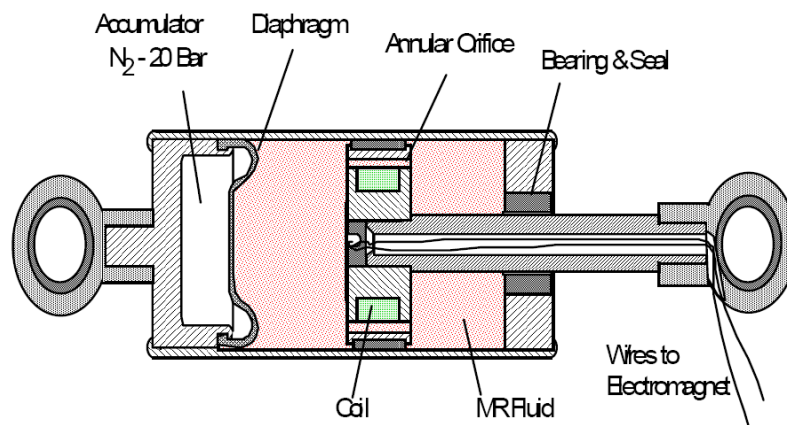


Figura 4.7 Amortiguador de fluido magneto-reológico Rheonetic RD-1001-4.

El uso de estos amortiguadores en suspensiones de asiento favorece un control en tiempo real de una posición óptima para ejercer la conducción. Esto se debe a que se consigue adaptar automáticamente el peso del cuerpo del conductor así como los niveles de choque y de vibración debidos al terreno por el que se circula.

De esta forma, se consigue un ambiente de trabajo más seguro, dado que se mejora la sensibilidad de la conducción, reduciendo la fatiga que se produce, y por tanto, reduciendo el nivel de riesgos de sufrir accidentes.

4.4.2 Amortiguadores de vibración

En el control de vibraciones es importante la utilización de dispositivos de amortiguamiento y los amortiguadores de fluido viscoso son elementos que aprovechan las propiedades del fluido para proveer una fuerza que contrarreste los efectos de la vibración. En la figura 4.8 se muestra un amortiguador magneto-reológico utilizado en el control activo de vibraciones en aplicaciones industriales.

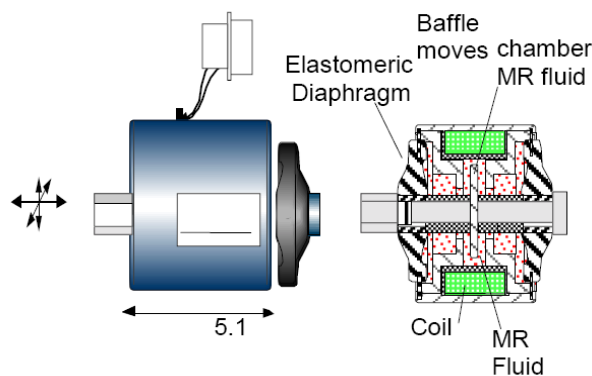


Figura 4.8 Amortiguador de vibraciones Rheonetic RD-1013-1.

Una de las aplicaciones más comunes dentro de los amortiguadores de vibración empleados en la industria es la de absorber las vibraciones de las lavadoras, y con ello el ruido producido por las mismas. Se puede observar en la figura 4.8 como se emplean los amortiguadores para reducir el efecto de la vibración [20].

4.4.3 Control de vibración sísmica en estructuras

La prueba del incremento en el crecimiento de la tecnología de dispositivos magneto-reológico es que se han diseñado y construido amortiguadores de tamaño apropiado para aplicaciones en ingeniería civil. En la figura 4.9 se muestra un esquema de un amortiguador de fluido magneto-reológico de gran escala.

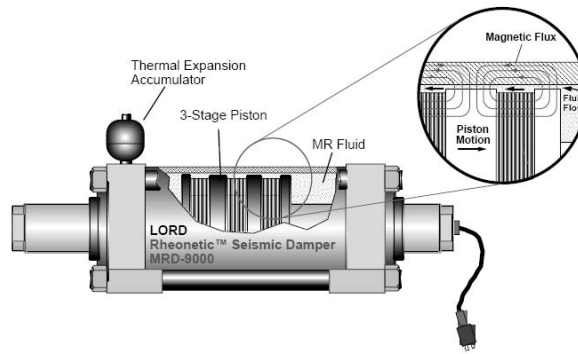


Figura 4.9 Amortiguador sísmico Rheonetic MRD-9000.

Una de las aplicaciones más frecuentes consiste en la protección sísmica de edificios, este hecho se debe a unas características muy determinadas de este tipo de amortiguadores.

Estos amortiguadores amplían el control sobre los choques sísmicos iniciales como los de las réplicas gracias a su alta fuerza de disipación a velocidad baja, características que fundamentalmente actúan frente al choque de las réplicas. No obstante, la reducción del choque inicial, se debe a su rápido tiempo de respuesta, así como a su alto margen dinámico, lo cual permite una optimización continua del sistema.

Otra de las aplicaciones civiles donde más se utiliza este tipo de dispositivos es el de los puentes suspendidos por cables, de esta forma, al situar los amortiguadores atados a los cables proporciona una situación continuamente controlable frente a las tensiones producidas por el viento y la lluvia.

4.4.4 Prótesis médicas

La principal aplicación de este tipo de amortiguadores en la industria médica se trata de la mejora en la movilidad de aquella pierna que fue amputada por encima de la rodilla. Biederman Motech, un fabricante alemán de productos protésicos desarrolló un sistema que aumenta el equilibrio del paso, la estabilidad y la eficiencia de la energía empleada al caminar.

Este sistema, aparte de disponer de un amortiguador, contenía un sistema de sensores que transferían la información a un programa informático, que a su vez transmitía la orden necesaria al amortiguador.

4.5 Amortiguación por fluidos magneto-reológicos en vehículos

El sistema de control de los amortiguadores magneto-reológicos, responde en tiempo real a las condiciones del asfalto y de la conducción, basándose en las entradas proporcionadas por sensores que monitorizan los movimientos del cuerpo y las ruedas de vehículo. Razones por las que supera los tradicionales conflictos entre circulación y maniobrabilidad, por un lado enviando unas mayores fuerzas máximas de amortiguación para soportar superficies bacheadas, mientras que por otro, reduce las fuerzas mínimas de amortiguación para mejorar el aislamiento y la suavidad en la conducción.

Cuando el amortiguador está en funcionamiento, se aplica corriente a una bobina en el interior del pistón de un amortiguador sin válvulas para controlar el flujo del fluido magneto-reológico. Dicho fluido contiene partículas de hierro, por lo que al variar la fuerza del campo magnético se cambia el límite y la resistencia del fluido dentro del amortiguador.

Esto produce un sistema de amortiguamiento mecánicamente simple pero de respuesta extremadamente controlable, lo cual proporciona una conducción más plana en las curvas cerradas y reduce la llamada “clavada” durante la frenada y que se levante el morro del coche durante la aceleración. Esto sirve para una mejor circulación y maniobrabilidad de aquella que proporciona una suspensión de tipo pasiva.

Un equipo de sensores es usado en este sistema. Consiste en un sensor de desplazamiento de la suspensión en cada rueda, un acelerómetro lateral, y un sensor del desplazamiento del volante durante la conducción.

Los sensores determinan las velocidades absolutas del levantamiento del cuerpo del vehículo, así como los propios giros de balanceo y cabeceo. Mientras tanto, un algoritmo controla la distribución de la carga normal a través de las bandas del neumático al variar el nivel de amortiguación en cada rueda de acuerdo con las condiciones de movimiento.

Cualquier nivel de amortiguamiento entre las bajas fuerzas en el estado desmagnetizado hasta las elevadas fuerzas en el estado magnetizado puede ser obtenido con este tipo de amortiguadores.

Este sistema proporciona continuamente amortiguación variable en tiempo real (CVRTD, *Continuously Variable Real Time Damping*) que supera con creces otros sistemas de amortiguación variable, y sin las caras válvulas electromecánicas que en estos se encuentran.

Comparados con los sistemas de amortiguación variable actuales disponibles en el mercado, este nuevo sistema es más rápido y además, el sistema proporciona una mejor respuesta.

4.5.1 Beneficios

El comportamiento global de la amortiguación del sistema puede ser controlado para ajustarse a los requerimientos de cualquier vehículo. Los datos experimentales llevados a cabo por los expertos muestran que este tipo de sistemas pueden aportar los siguientes beneficios:

- Aumentar el control de los movimientos del chasis para llevar a cabo una conducción llana y sencilla.
- Optimizar el agarre de la calzada o pavimento para conseguir un mayor control de las ruedas y una mayor sensación de seguridad.
- Controlar las características de la transferencia de cargas lateral y longitudinal de la suspensión durante maniobras transitorias.
- Reducir la transmisión de las perturbaciones de alta frecuencia de la calzada a través de los amortiguadores gracias a un mejor aislamiento de la calzada.

5 Modelado de un Amortiguador Magneto-reológico

5. MODELADO DE UN AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

El modelado de los amortiguadores magneto-reológicos se utiliza para describir el comportamiento dinámico de los mismos, por ejemplo la relación existente entre la fuerza de amortiguación, la velocidad y la corriente suministrada. Existen dos aproximaciones generales para describir el comportamiento de los amortiguadores magneto-reológicos, la primera de ellas consiste en modelar el comportamiento observado experimentalmente, y por otro lado, sacar el comportamiento del amortiguador en función del análisis de la mecánica de fluidos. Por lo general, en los estudios de modelos se presentan también resultados experimentales, que son usados para validar el modelo propuesto. Por otra parte, cabe destacar que la mayoría de los modelos son diseñados estudiando la respuesta experimental de los amortiguadores sujetos a carga sinusoidal y a la hipótesis de que el fluido fluye en un flujo cuasi estable.

Tres de los modelos más comúnmente empleados para predecir el comportamiento experimental de los amortiguadores son el plástico no lineal de Bingham, el biviscoso no lineal y el biviscoso histerético no lineal, los dos primeros son modelos cuasiestáticos, que no tienen en cuenta el comportamiento de histéresis del amortiguador, mientras que el último es un modelo dinámico, que si tiene en cuenta el comportamiento de histéresis [21]. Estos modelos se muestran en la figura 5.1. Las líneas discontinuas de la figura muestran la respuesta predicha por los modelos, mientras que las líneas continuas muestran el comportamiento observado experimentalmente. Los parámetros para estos modelos dependen de la corriente suministrada y son determinados por los resultados experimentales. El modelo de plástico no lineal Bingham asume que el fluido no se mueve hasta que la fuerza producida, F_y , sea excedida. Después de este punto, el fluido asume un comportamiento de un fluido lineal viscoso. El modelo biviscoso no lineal es una ampliación del modelo de Bingham incorporando amortiguación inicial lineal. En el caso de la excitación sinusoidal, los amortiguadores magneto-reológicos presentan histéresis y para capturar este comportamiento fue desarrollado el modelo biviscoso no lineal histerético. Además, este modelo, el biviscoso no lineal histerístico es el más exacto en cuanto a la descripción del comportamiento del amortiguador magneto-reológico.

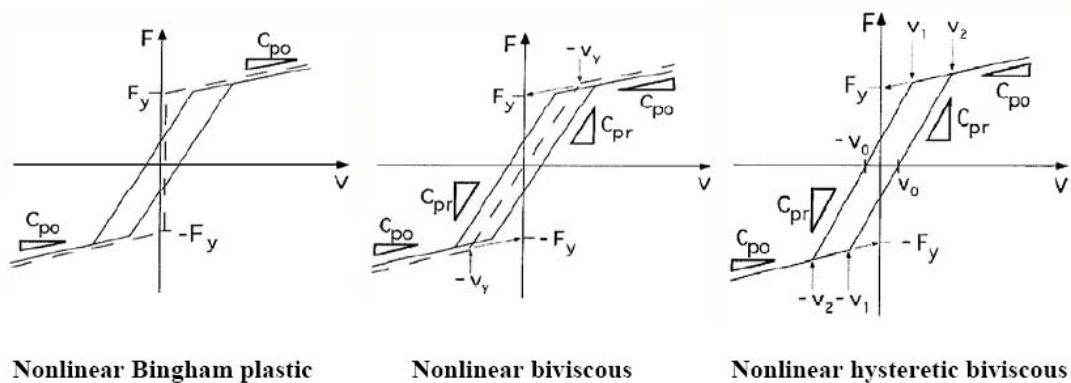


Figura 5.1 Modelos no lineales.

Snyder et al. [22] compararon los tres modelos comunes no lineales y ampliaron sobre otro modelo, el modelo plástico no lineal viscoelástico (NVEP).

Un método diferente para capturar ciclos de histéresis es el de Bouc-Wen. Spencer et al. [23] presentan un modelo Bouc-Wen básico, aplicando modificaciones adicionales a dicho modelo. Su trabajo también incluye un modelo para considerar la relación entre el voltaje de entrada y el fluido magneto-reológico en equilibrio. Yang et al. [24] amplían el modelo presentado por Spencer et al., de tal forma que modelan tanto el circuito magnético como el conductor de corriente. Para reducir el tiempo de respuesta del amortiguador, Yang et al. concluyen que las bobinas electromagnéticas deberían encontrarse dispuestas en la paralela a la línea de acción del amortiguador y el voltaje disponible en el conductor de corriente debería ser tan alto como fuera posible. Además, para reducir la influencia del efecto residual magnético que presentan cuando tiene que reducir la corriente en las bobinas, muestran que la conducción de la corriente en la dirección perpendicular mejora considerablemente el tiempo de respuesta. A su vez, para el amortiguador magneto-reológico estudiaron que el conductor de corriente es capaz de reducir el tiempo requerido para suministrar una corriente dada por un factor 15 cuando es comparado con una entrada de voltaje constante.

Otra técnica para modelar el comportamiento de un fluido magneto-reológico está basada en la dinámica del propio fluido. Una técnica que se basa en la ecuación de Herschel-Bulkley. Wang et al. [25] consideran efectos de compresibilidad y proporciona un desarrollo detallado de las ecuaciones que gobiernan el modelo. Además, los parámetros del modelo se encuentran relacionados con el diseño. El estudio concluye validando el modelo con resultados experimentales.

Para entender el tiempo de respuesta de los fluidos magneto-reológicos y electro-reológicos (ER), Choi et al. [26] desarrollan un número de criterios sin dimensiones para el control de flujo del fluido magneto-reológico y electro-reológico por placas paralelas. Basada en simulaciones analíticas y resultados experimentales, concluyen que los fluidos magneto-reológicos son mejor para usos donde sean altas las exigencias de funcionamiento controlables. Sin embargo, se advierte que los fluidos magneto-reológicos no responden tan rápido como los fluidos electro-reológicos para configuraciones equivalentes.

5.1 Modelo de Bouc-Wen

Se han desarrollado un gran número de modelos para predecir el comportamiento de los amortiguadores magneto-reológicos, pero el que retrata con mayor exactitud la respuesta de un amortiguador magneto-reológico es el desarrollado por Spencer et al. [23], la solución que proponen es la de un modelo modificado Bouc-Wen (BW), que tiene un conjunto de parámetros en función de la corriente suministrada. Otros investigadores [27], [28] y [29] han estudiado la eficacia del modelo de identificación basado en algunos paradigmas de la inteligencia computacional (lógica difusa y redes neuronales).

Existen varios modelos mecánicos para describir el comportamiento dinámico de un amortiguador magneto-reológico. Los mejores resultados a la hora de retratar el

comportamiento de histéresis son obtenidos al utilizar el modelo Bouc-Wen representado en la figura 5.2.

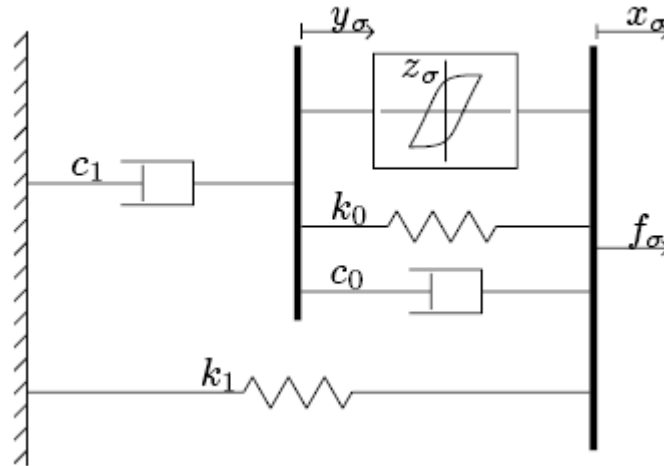


Figura 5.2 Modelo Bouc-Wen.

En este modelo, la fuerza de amortiguación (F) generada por el dispositivo es dada por:

$$F = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (5.1)$$

donde x es el desplazamiento total relativo y x_0 la desviación inicial del acumulador de gas en espiral con rigidez k_1 . El desplazamiento parcial relativo y y la variable evolutiva z son gobernadas por las ecuaciones acopladas diferenciales:

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [c_0 \dot{x} + k_0(x - y) + kz] \quad (5.2)$$

donde la k es un coeficiente de rigidez asociado con el desplazamiento de z :

$$\dot{z} = -d|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - g(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + \alpha(\dot{x} - \dot{y}) \quad (5.3)$$

donde n , d , g , α y k_1 son los “parámetros de lazo” que controlan la forma y la magnitud de los lazos histéricos. Por medio de una elección apropiada de estos parámetros de lazo en este modelo diferencial, es posible obtener una representación experimental de los lazos histéricos reales muy buena. Estos modelos diferenciales tienen muchas ventajas en el análisis de vibración. La más importante es que estos modelos pueden ser fácilmente configurados a través de las ecuaciones de cálculo diferencial del sistema para dar lugar a un sistema totalmente diferente.

Los parámetros c_0 , c_1 , k y k_0 se asumen como funciones de la corriente aplicada al amortiguador magneto-reológico: $i=i(t)$, $c_0=c_0(i)$, $c_1=c_1(i)$, $k=k(i)$ y $k_0=k_0(i)$. Si $i_0(i)$ es la corriente suministrada, entonces la dinámica implicada en el fluido magneto-reológico

alcanza el equilibrio reológico cuando es modelada por un filtro de primer orden donde la T es un tiempo constante:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{1}{T}(i - i_0) \quad (5.4)$$

Algunos investigadores como Giucle et al. [30] realizan el estudio de los parámetros del modelo Bouc-Wen mediante algoritmos genéticos. Para lo cual realizan el estudio paramétrico como si se tratase de un problema de optimización de caja negra.

Las técnicas de algoritmos genéticos son robustas en la búsqueda probabilística, con resultados muy buenos en la optimización de caja negra. Están basadas en el mecanismo de genética natural y la selección natural, que comienza con una generación de soluciones del problema y se evoluciona hacia mejores soluciones [31].

6 Algoritmos Genéticos

6. ALGORITMOS GENÉTICOS

Los Algoritmos Genéticos (AGs) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acorde con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes, postulados por Darwin (1859) [32]. Por imitación de este proceso, los Algoritmos Genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende en buena medida de una adecuada codificación de las mismas [33].

En la naturaleza los individuos de una población compiten entre sí en la búsqueda de recursos tales como comida, agua y refugio. Incluso los miembros de una misma especie compiten a menudo en la búsqueda de un compañero. Aquellos individuos que tienen más éxito en sobrevivir y en atraer compañeros tienen mayor probabilidad de generar un gran número de descendientes. Por el contrario, individuos poco dotados producen un menor número de descendientes. Esto significa que los genes de los individuos mejor adaptados se propagan en sucesivas generaciones hacia un número de individuos creciente. La combinación de buenas características provenientes de diferentes ancestros puede a veces producir descendientes “superindividuos”, cuya adaptación es mucho mayor que la de cualquiera de sus ancestros. De esta manera, las especies evolucionan logrando unas características cada vez mejor adaptadas al entorno en el que viven.

Los Algoritmos Genéticos usan una analogía directa con el comportamiento natural. Trabajan con una población de individuos, cada uno de los cuales representa una solución factible a un problema dado. A cada individuo se le asigna un valor o puntuación, relacionado con la bondad de dicha solución. En la naturaleza esto equivaldría al grado de efectividad de un organismo para competir por unos determinados recursos. Cuanto mayor sea la adaptación de un individuo al problema, mayor será la probabilidad de que el mismo sea seleccionado para reproducirse, cruzando su material genético con otro individuo seleccionado de igual forma, estos individuos se llamarán “padres”. Este cruce producirá nuevos individuos (llamados “hijos”) los cuales comparten algunas de las características de sus padres. Cuanto menor sea la adaptación de un individuo, menor será la probabilidad de que dicho individuo sea seleccionado para la reproducción, y por tanto de que su material genético se propague en sucesivas generaciones.

De esta manera se produce una nueva población de posibles soluciones, la cual reemplaza a la anterior. Así a lo largo de las generaciones las buenas características se propagan a través de la población. Favoreciendo el cruce de los individuos mejor adaptados, van siendo exploradas las áreas más prometedoras del espacio de búsqueda. Si el Algoritmo Genético ha sido bien diseñado, la población convergerá hacia una solución óptima del problema.

El poder de los Algoritmos Genéticos proviene del hecho de que se trata de una técnica robusta, y pueden tratar con éxito una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas, incluyendo aquellos en los que otros métodos encuentran dificultades.

Si bien no se garantiza que el Algoritmo Genético encuentre la solución óptima del problema, existe evidencia empírica de que se encuentran soluciones de un nivel aceptable, en un tiempo menor respecto al resto de algoritmos de optimización combinatoria. En el caso de que existan técnicas especializadas para resolver un determinado problema, lo más probable es que superen al Algoritmo Genético, tanto en rapidez como en eficacia. El gran campo de aplicación de los Algoritmos Genéticos se relaciona con aquellos problemas para los cuales no existen técnicas especializadas. Incluso en el caso en que dichas técnicas existan, y funcionen bien, pueden efectuarse mejoras de las mismas hibridándolas con los Algoritmos Genéticos.

6.1 El Algoritmo Genético Simple

El Algoritmo Genético Simple (AGS), también denominado Canónico, se representa en la figura 6.1. Como se verá a continuación, se necesita una codificación o representación del problema, que resulte adecuada al mismo. Además se requiere una función de ajuste o adaptación al problema, la cual asigna un número real a cada posible solución codificada. Durante la ejecución del algoritmo, los padres son seleccionados para la reproducción, a continuación dichos padres seleccionados se cruzan generando dos hijos, sobre cada uno de los cuales actuará un operador de mutación. El resultado de la combinación de las anteriores funciones será un conjunto de individuos (posibles soluciones al problema), los cuales en la evolución del Algoritmo Genético formarán parte de la siguiente población.

```
BEGIN /* Algoritmo Genetico Simple */
  Generar una poblacion inicial.
  Computar la funcion de evaluacion de cada individuo.
  WHILE NOT Terminado DO
    BEGIN /* Producir nueva generacion */
      FOR Tamaño poblacion/2 DO
        BEGIN /*Ciclo Reproductivo */
          Seleccionar dos individuos de la anterior generacion,
          para el cruce (probabilidad de seleccion proporcional
          a la funcion de evaluacion del individuo).
          Cruzar con cierta probabilidad los dos
          individuos obteniendo dos descendientes.
          Mutar los dos descendientes con cierta probabilidad.
          Computar la funcion de evaluacion de los dos
          descendientes mutados.
          Insertar los dos descendientes mutados en la nueva generacion.
        END
      IF la poblacion ha convergido THEN
        Terminado := TRUE
      END
    END
  END
```

Figura 6.1 Pseudocódigo del Algoritmo Genético Simple.

6.1.1 Codificación

Se supone que los individuos (posibles soluciones del problema) pueden representarse como un conjunto de parámetros (que se denominan genes), que agrupados forman un conjunto de valores (a menudo referida como cromosoma). Si bien el alfabeto utilizado para representar los individuos no debe necesariamente estar constituido por el $[0,1]$, buena parte de la teoría en la que se fundamentan los Algoritmos Genéticos utiliza dicho alfabeto.

En términos biológicos, el conjunto de parámetros representando un cromosoma particular se denomina fenotipo. El fenotipo contiene la información requerida para construir un organismo, el cual se refiere como genotipo. Los mismos términos se utilizan en el campo de los Algoritmos Genéticos. La adaptación al problema de un individuo depende de la evaluación del genotipo. Esta última puede inferirse a partir del fenotipo, es decir puede ser computada a partir del cromosoma, usando la función de evaluación.

La función de adaptación debe ser diseñada para cada problema de manera específica. Dado un cromosoma particular, la función de adaptación le asigna un número real, que se supone refleja el nivel de adaptación al problema del individuo representado por el cromosoma.

6.2 Extensiones y Modificaciones del AGS

En este apartado se introducirán algunas extensiones y modificaciones del Algoritmo Genético Simple (AGS).

6.2.1 Población inicial

Los Algoritmos Genéticos trabajan con una población inicial, a partir de la cual se irán obteniendo nuevos individuos que se irán adaptando mejor a la solución que se busca del problema.

Habitualmente la población inicial se escoge generando ristas al azar, pudiendo contener cada gen uno de los posibles valores del alfabeto con probabilidad uniforme. Existen algunos trabajos en los que los individuos de la población inicial se han obtenido como resultado de alguna técnica heurística o de optimización local. En estos se constata que esta inicialización no aleatoria de la población inicial, puede acelerar la convergencia del Algoritmo Genético. Sin embargo, en algunos casos la desventaja resulta ser la prematura convergencia del algoritmo, queriendo indicar con ésto la convergencia hacia óptimos locales.

6.2.1.1 *Tamaño de la población*

Una cuestión que uno puede plantearse es la relacionada con el tamaño idóneo de la población. Parece intuitivo que las poblaciones pequeñas corren el riesgo de no cubrir adecuadamente el espacio de búsqueda, mientras que el trabajar con poblaciones de gran tamaño puede acarrear problemas relacionados con el excesivo costo computacional.

Goldberg (1989) [34] efectuó un estudio teórico, obteniendo como conclusión que el tamaño óptimo de la población para ristra de longitud l , con codificación binaria, crece exponencialmente con el tamaño de la ristra.

Este resultado traería como consecuencia que la aplicabilidad de los Algoritmos Genéticos en problemas reales sería muy limitada, ya que resultarían no competitivos con otros métodos de optimización combinatoria. Alander (1992) [35], bastándose en evidencia empírica, sugiere que un tamaño de población comprendida entre l y $2l$ es suficiente para atacar con éxito los problemas por él considerados.

6.2.2 *Función objetivo*

Dos aspectos que resultan cruciales en el comportamiento de los Algoritmos Genéticos son la determinación de una adecuada función de adaptación o función objetivo, así como la codificación utilizada.

Idealmente interesaría construir funciones objetivo con “ciertas regularidades”, es decir, funciones objetivo que verifiquen que para dos individuos que se encuentren cercanos en el espacio de búsqueda, sus respectivos valores en las funciones objetivo sean similares. Por otra parte una dificultad en el comportamiento del Algoritmo Genético puede ser la existencia de gran cantidad de óptimos locales, así como el hecho de que el óptimo global se encuentre muy aislado.

La regla general para construir una buena función objetivo es que ésta debe reflejar el valor del individuo de una manera “real”, pero en muchos problemas de optimización combinatoria, donde existen gran cantidad de restricciones, buena parte de los puntos del espacio de búsqueda representan individuos no válidos.

Para este planteamiento en el que los individuos están sometidos a restricciones, se han propuesto varias soluciones. La primera sería la que se podría denominar absolutista, en la que aquellos individuos que no verifican las restricciones, no son considerados como tales, y se siguen efectuando cruces y mutaciones hasta obtener individuos válidos, o bien, a dichos individuos se les asigna una función objetivo igual a cero.

Otra posibilidad consiste en reconstruir aquellos individuos que no verifican las restricciones. Dicha reconstrucción suele llevarse a cabo por medio de un nuevo operador que se acostumbra a denominar reparador.

Otro enfoque está basado en la penalización de la función objetivo. La idea general consiste en dividir la función objetivo del individuo por una cantidad (la penalización) que guarda relación con las restricciones que dicho individuo viola. Dicha cantidad puede simplemente tener en cuenta el número de restricciones violadas o bien el denominado costo esperado de reconstrucción, es decir, el coste asociado a la conversión de dicho individuo en otro que no viole ninguna restricción.

Otra técnica que se ha venido utilizando en el caso en que la computación de la función objetivo sea muy compleja es la denominada evaluación aproximada de la función objetivo. En algunos casos, la obtención de n funciones objetivo aproximadas puede resultar mejor que la evaluación exacta de una única función objetivo (supuesto el caso de que la evaluación aproximada resulta como mínimo n veces más rápida que la evaluación exacta).

Un problema habitual en las ejecuciones de los Algoritmos Genéticos surge debido a la velocidad con la que el algoritmo converge. En algunos casos la convergencia es muy rápida, lo que suele denominarse convergencia prematura, en que el algoritmo converge hacia óptimos locales, mientras que en otros casos el problema es justo el contrario, es decir, se produce una convergencia lenta del algoritmo. Una posible solución a estos problemas pasa por efectuar transformaciones en la función objetivo. El problema de la convergencia prematura, surge a menudo cuando la selección de individuos se realiza de manera proporcional a su función objetivo. En tal caso, pueden existir individuos con una adaptación al problema muy superior al resto, que a medida que avanza el algoritmo “dominan” a la población. Por medio de una transformación de la función objetivo, en este caso una comprensión del rango de variación de la misma, se pretende que dichos “superindividuos” no lleguen a dominar a la población.

El problema de la lenta convergencia del algoritmo se resolvería de manera análoga, pero en este caso efectuando una expansión del rango de la función objetivo.

La idea de especies de organismos ha sido imitada en el diseño de los Algoritmos Genéticos en un método propuesto por Goldberg y Richardson (1987) [36], utilizando una modificación de la función objetivo de cada individuo, de tal manera que individuos que estén muy cercanos entre sí devalúen su función objetivo, con objeto de que la población gane en diversidad.

Por ejemplo, si se denota por $d(I_t^j, I_t^i)$ a la *distancia de Hamming*¹ entre los individuos I_t^j e I_t^i , y por $K \in R^+$ a un parámetro, se puede definir la siguiente función:

$$h(d(I_t^j, I_t^i)) = \begin{cases} K - d(I_t^j, I_t^i), & \text{si } d(I_t^j, I_t^i) < K, \\ 0, & \text{si } d(I_t^j, I_t^i) \geq K. \end{cases} \quad (6.1)$$

¹ La efectividad de los códigos de bloque depende de la diferencia entre una palabra de código válida y otra. Cuanto mayor sea esta diferencia, menor es la posibilidad de que un código válido se transforme en otro código válido por una serie de errores. A esta diferencia se le llama *distancia de Hamming*, y se define como el número de bits que tienen que cambiarse para transformar una palabra de código válida en otra palabra de código válida.

A continuación para cada individuo I_t^j , se define $\delta_j^t = \sum_{i \neq j} h(d(I_t^j, I_t^i))$ valor que se utiliza para devaluar la función objetivo del individuo en cuestión. Es decir, $g^*(I_t^j) = g(I_t^j) / \sigma_j^y$. De esta manera aquellos individuos que están cercanos entre sí se verá devaluada la probabilidad de ser seleccionados como padres, aumentándose la probabilidad de los individuos que se encuentran más aislados.

6.2.3 Selección

La función de selección de padres más utilizada es la denominada función de selección proporcional a la función objetivo, en que cada individuo tiene una probabilidad de ser seleccionado como padre que es proporcional al valor de su función objetivo.

Denotando por $p_{j,t}^{prop}$ la probabilidad de que el individuo I_t^j sea seleccionado como padre, se tiene que:

$$p_{j,t}^{prop} = \frac{g(I_t^j)}{\sum_{j=1}^{\lambda} g(I_t^j)} \quad (6.2)$$

Esta función de selección es invariante ante un cambio de escala, pero no ante una traslación.

Una de las maneras de superar el problema relacionado con la rápida convergencia proveniente de los superindividuos, que surge al aplicar la anterior función de selección, es el efectuar la selección proporcional al rango del individuo, con lo que se produce una repartición más uniforme de la probabilidad de selección, tal y como se muestra en la figura 6.2.

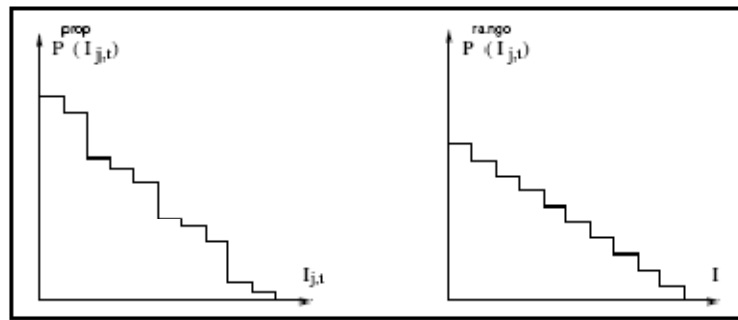


Figura 6.2 Esquemas de selección de padres proporcional a la función objetivo (izquierda) y proporcional al rango de la función objetivo (derecha).

Si se denota por $\text{rango}(I_t^j)$, el rango de la función objetivo del individuo I_t^j cuando los individuos de la población han sido ordenados de menor a mayor (es decir, el peor individuo tiene rango 1, mientras que el individuo con mejor función objetivo tiene rango λ), y sea $p_{j,t}^{rango}$ la probabilidad de que el individuo I_t^j sea seleccionado como

padre cuando la selección se efectúa proporcionalmente al rango del individuo, se tiene que:

$$p_{j,t}^{rango} = \frac{rango(g(I_t^j))}{\lambda(\lambda+1)/2} \quad (6.3)$$

La suma de los rangos, $\lambda(\lambda+1)/2$, constituye la constante de normalización. La función de selección basada en el rango es invariante frente a la translación y al cambio de escala.

Otro posible refinamiento del modelo de selección proporcional es el modelo de selección del valor esperado, que actúa de la manera siguiente: para cada individuo I_t^j , se introduce un contador, inicializado en $g(I_t^j)/\bar{g}_t$, donde \bar{g}_t denota la media de la función objetivo en la generación t . Cada vez que el individuo I_t^j es seleccionado para el cruce, dicho contador decrece en una cantidad $c(c \in (0.5;1))$. El individuo en cuestión deja de poder ser seleccionado en esa generación, cuando su contador sea negativo.

Un esquema de selección, introducido por Brindle (1991) [37], y que empíricamente ha proporcionado buenos resultados, es el denominado muestreo estocástico con reemplazamiento del resto, en que cada individuo es seleccionado un número de veces que coincide con la parte entera del número esperado de ocurrencias de dicho suceso, compitiendo los individuos por los restos. Es decir, si se denota por $n(I_t^j)$ el número de veces que el individuo I_t^j es seleccionado para el cruce, se tiene que:

$$n(I_t^j) = n_1(I_t^j) + n_2(I_t^j), \quad (6.4)$$

donde $n_1(I_t^j) = \left\lfloor g(I_t^j)/\bar{g}_t \right\rfloor$, y $n_2(I_t^j)$ corresponde a la componente aleatoria que resulta de muestrear sobre los $\lambda - \sum_{j=1}^{\lambda} \left\lfloor g(I_t^j)/\bar{g}_t \right\rfloor$ restantes individuos, siendo el muestro proporcional a la función objetivo de cada individuo.

Baker (1987) [38] introduce un método denominado muestreo universal estocástico, que utiliza un único giro de la ruleta siendo los sectores circulares proporcionales a la función objetivo. Los individuos son seleccionados a partir de marcadores (véase figura 6.3), igualmente espaciados y con comienzo aleatorio.

Efectuando un paralelismo con los métodos de muestreo estadísticos, este último tipo de selección de padres se relaciona con el muestreo sistemático, mientras que la selección proporcional a la función objetivo está basada en el muestreo estratificado proporcional al tamaño. También el procedimiento de selección que se ha denominado muestreo estocástico con reemplazamiento del resto, mantiene un paralelismo con el muestreo estratificado de compromiso.

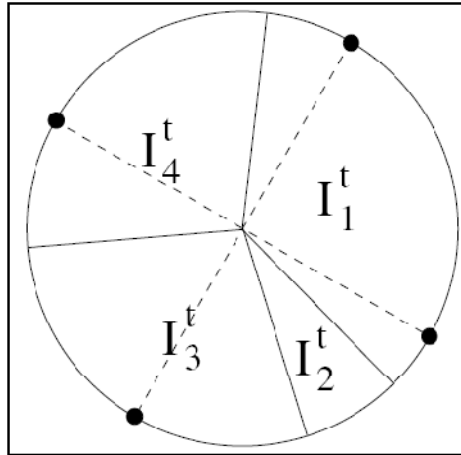


Figura 6.3 Método de selección de padres denominado muestreo universal estocástico. El individuo I_1^t se escoge 2 veces, mientras que I_3^t e I_4^t son elegidos una única vez.

La selección por torneo constituye un procedimiento de selección de padres muy extendido y en el que la idea consiste en escoger al azar un número de individuos de la población, tamaño del torneo, (con o sin reemplazamiento), seleccionar el mejor individuo de este grupo, y repetir el proceso hasta que el número de individuos seleccionados coincida con el tamaño de la población. Habitualmente el tamaño del torneo es 2, y en tal caso se ha utilizado una versión probabilística en el que se permite la selección de individuos sin que necesariamente sean los mejores.

Una posible clasificación de procedimientos de selección de padres consistirá en: métodos de selección dinámicos, en los que las probabilidades de selección varían de generación a generación, (por ejemplo la selección proporcional a la función objetivo), frente a métodos de selección estáticos, en los que dichas probabilidades permanecen constantes (por ejemplo la selección basada en rangos).

Si se asegura que todos los individuos tienen asignada una probabilidad de selección distinta de cero, el método de selección se denomina preservativo. En caso contrario se acostumbra a denominarlo extintivo.

6.2.4 Cruce

Durante la fase reproductiva se seleccionan los individuos de la población para cruzarse y producir descendientes, que constituirán, una vez mutados, la siguiente generación de individuos. La selección de padres se efectúa al azar usando un procedimiento que favorezca a los individuos mejor adaptados, ya que a cada individuo se le asigna una probabilidad de ser seleccionado que es proporcional a su función de adaptación. Este procedimiento se dice que está basado en la ruleta sesgada. Según dicho esquema, los individuos bien adaptados se escogerán probablemente varias veces por generación, mientras que los pobremente adaptados al problema, no se escogerán más que de vez en cuando.

Una vez seleccionados dos padres, sus cromosomas se combinan, utilizando habitualmente los operadores de cruce y mutación. Las formas básicas de dichos operadores se describen a continuación.

El operador de cruce coge dos padres seleccionados y corta sus ristas de cromosomas en una posición escogida al azar, para producir dos subristras iniciales y dos subristras finales. Después se intercambian las subristras finales, produciéndose dos nuevos cromosomas completos (véase la Figura 6.4). Ambos descendientes heredan genes de cada uno de los padres. Este operador se conoce como operador de cruce basado en un punto. Habitualmente el operador de cruce no se aplica a todos los pares de individuos que han sido seleccionados para emparejarse, sino que se aplica de manera aleatoria, normalmente con una probabilidad comprendida entre 0.5 y 1.0. En el caso en que el operador de cruce no se aplique, la descendencia se obtiene simplemente duplicando los padres.

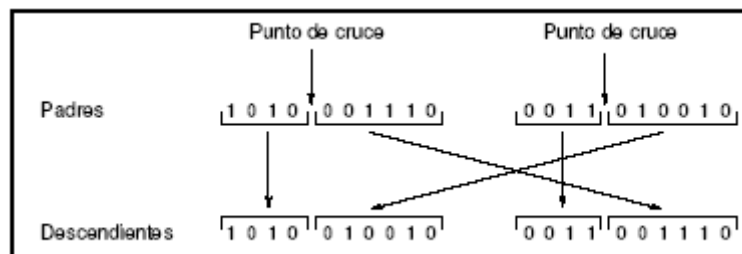


Figura 6.4 Operador de cruce basado en un punto.

Se han investigado otros operadores de cruce, habitualmente teniendo en cuenta más de un punto de cruce. De Jong (1975) [39] investigó el comportamiento del operador de cruce basado en múltiples puntos, concluyendo que el cruce basado en dos puntos, representaba una mejora mientras que añadir más puntos de cruce no beneficiaba el comportamiento del algoritmo. La ventaja de tener más de un punto de cruce radica en que el espacio de búsqueda puede ser explorado más fácilmente, siendo la principal desventaja el hecho de aumentar la probabilidad de ruptura de buenos esquemas.

En el operador de cruce basado en dos puntos, los cromosomas (individuos) pueden contemplarse como un circuito en el que se efectúa la selección aleatoria de dos puntos, tal y como se muestra en la figura 6.5.

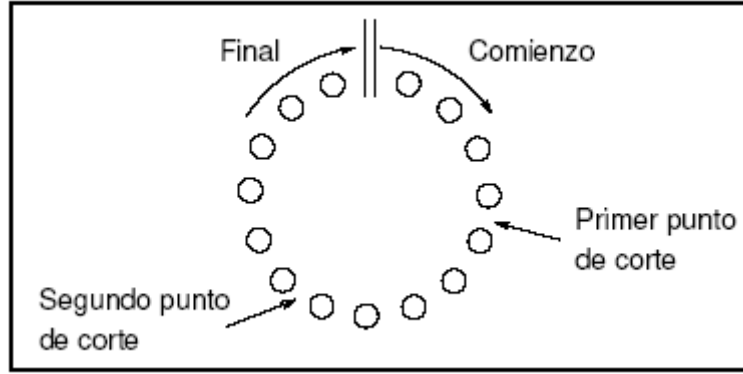


Figura 6.5 Individuo visto como un circuito.

Desde este punto de vista, el cruce basado en un punto, puede verse como un caso particular del cruce basado en dos puntos, en el que uno de los puntos de corte se encuentra fijo al comienzo de la ristra que representa al individuo (véase figura 6.6).

En el denominado operador de cruce uniforme (Syswerda (1991) [40]) cada gen en la descendencia se crea copiando el correspondiente gen de uno de los dos padres, escogido de acuerdo a una “máscara de cruce” generada aleatoriamente. Cuando existe un 1 en la “máscara de cruce”, el gen es copiado del primer padre, mientras que cuando exista un 0 en la máscara, el gen se copia del segundo padre. En la literatura, el término operador de cruce uniforme se relaciona con la obtención de la “máscara de cruce” uniforme, en el sentido de que cualquiera de los elementos del alfabeto tenga asociada la misma probabilidad. Hablando en términos de la teoría de la probabilidad, la máscara de cruce está compuesta por una muestra aleatoria de tamaño λ extraída de una distribución de probabilidad de Bernoulli de parámetro $1/2$.

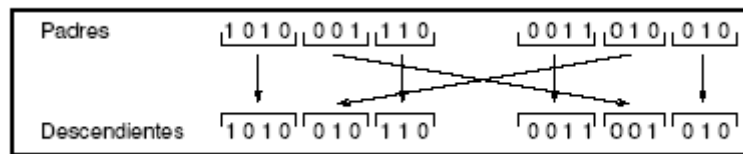


Figura 6.6 Operador de cruce basado en dos puntos.

Si se tuviese en cuenta el valor de la función de adaptación de cada padre en el momento de generar la “máscara de cruce”, de tal manera que cuanto mayor sea la función de adaptación de un individuo, más probable sea heredar sus características, se podría definir, véase Larrañaga y Poza (1994) [41], un operador de cruce basado en la función objetivo, en el que la “máscara de cruce” se interpreta como una muestra aleatoria de tamaño l proveniente de una distribución de Bernoulli de parámetro donde I_t^j y I_t^i denotan los padres seleccionados para ser cruzados:

$$p = g(I_t^j) / (g(I_t^j) + g(I_t^i)) \quad (6.4)$$

El concepto de “máscara de cruce” puede también servir para representar los cruces basados en un punto y basados en múltiples puntos, tal y como se muestra en la figura 6.7.

Máscara de cruce	1 1 1 0 0 0 0	1 1 0 0 0 1
Padre 1	1 0 1 1 0 0 1	1 0 1 1 0 0
Descendiente	1 0 1 0 1 1 1	1 0 0 0 1 0
Padre 2	1 0 0 0 1 1 1	1 0 0 0 1 1

Figura 6.7 Operador de cruce uniforme.

Existen otros operadores de cruce específicos para un determinado problema como son, por ejemplo, los definidos para el TSP, que se tratarán más adelante.

Por otra parte, la idea de que el cruce debería de ser más probable en algunas posiciones ha sido descrita por varios autores (Holland, 1975 [42]; Davis, 1985 [43]).

6.2.5 Mutación

El operador de mutación se aplica a cada hijo de manera individual, y consiste en la alteración aleatoria (normalmente con probabilidad pequeña) de cada gen componente del cromosoma. La Figura 6.8 muestra la mutación del quinto gen del cromosoma. Si bien puede en principio pensarse que el operador de cruce es más importante que el operador de mutación, ya que proporciona una exploración rápida del espacio de búsqueda, este último asegura que ningún punto del espacio de búsqueda tenga probabilidad cero de ser examinado, y es de capital importancia para asegurar la convergencia de los Algoritmos Genéticos.

	gen mutado									
	↓									
Descendiente	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0
Descendiente mutado	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0

Figura 6.8 Operador de mutación.

Para criterios prácticos, es muy útil la definición de convergencia introducida en este campo por De Jong (1975) [39] en su tesis doctoral. Si el Algoritmo Genético ha sido correctamente implementado, la población evolucionará a lo largo de las generaciones sucesivas de tal manera que la adaptación media extendida a todos los individuos de la población, así como la adaptación del mejor individuo se irán incrementando hacia el óptimo global. El concepto de convergencia está relacionado con la progresión hacia la uniformidad: un gen ha convergido cuando al menos el 95% de los individuos de la población comparten el mismo valor para dicho gen. Se dice que la población converge cuando todos los genes han convergido. Se puede generalizar dicha definición al caso en que al menos un $\beta\%$ de los individuos de la población hayan convergido.

La Figura 6.9 muestra como varía la adaptación media y la mejor adaptación en un Algoritmo Genético Simple típico. A medida que el número de generaciones aumenta, es más probable que la adaptación media se aproxime a la del mejor individuo.

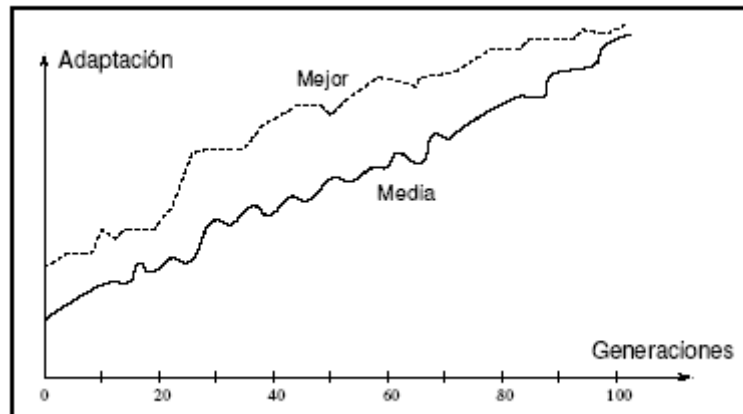


Figura 6.9 Adaptación media y mejor adaptación en un Algoritmo Genético Simple.

La mutación se considera un operador básico, que proporciona un pequeño elemento de aleatoriedad en la vecindad (entorno) de los individuos de la población. Si bien se admite que el operador de cruce es el responsable de efectuar la búsqueda a lo largo del espacio de posibles soluciones, también parece desprenderse de los experimentos efectuados por varios investigadores que el operador de mutación va ganando en importancia a medida que la población de individuos va convergiendo (Davis, 1985) [43].

Schaffer y col. (1989) [44] encuentran que el efecto del cruce en la búsqueda es inferior al que previamente se esperaba. Utilizan la denominada evolución primitiva, en la que, el proceso evolutivo consta tan sólo de selección y mutación. Encuentran que dicha evolución primitiva supera con creces a una evolución basada exclusivamente en la selección y el cruce. Otra conclusión de su trabajo es que la determinación del valor óptimo de la probabilidad de mutación es mucho más crucial que el relativo a la probabilidad de cruce.

La búsqueda del valor óptimo para la probabilidad de mutación es una cuestión que ha sido motivo de varios trabajos. Así, De Jong (1975) [39] recomienda la utilización de

una probabilidad de mutación del bit de l^{-l} , siendo l la longitud de cadena. Schaffer (1989) [44] utiliza resultados experimentales para estimar la tasa óptima proporcional a $1/\lambda^{0.9318}l^{0.4535}$, donde λ denota el número de individuos en la población.

Si bien en la mayoría de las implementaciones de Algoritmos Genéticos se asume que tanto la probabilidad de cruce como la de mutación permanecen constantes, algunos autores han obtenido mejores resultados experimentales modificando la probabilidad de mutación a medida que aumenta el número de iteraciones. Pueden consultarse los trabajos de Ackley (1987) [45], Bramlette (1991) [46], Fogarty (1989) [47] y Michalewicz y Janikow (1991) [48].

6.2.6 Reducción

Una vez obtenidos los individuos descendientes de una determinada población en el tiempo t , el proceso de reducción al tamaño original, consiste en escoger λ individuos de entre los λ individuos que forman parte de la población en el tiempo t , y los λ individuos descendientes de los mismos. Dicho proceso se suele hacer fundamentalmente de dos formas distintas.

O bien los λ individuos descendientes son los que forman parte de la población en el tiempo $t+1$, es lo que se denomina reducción simple, o bien se escogen de entre los 2λ individuos, los λ individuos más adaptados al problema, siguiendo lo que se puede denominar un criterio de reducción elitista de grado λ . Se puede también considerar otros procedimientos de reducción que se colocan entre los anteriores, por ejemplo, si se escogen los λ_1 mejores de entre padres y descendientes, escogiéndose los $\lambda - \lambda_1$ restantes de entre los descendientes no seleccionados hasta el momento.

El concepto de reducción está ligado con el de tasa de reemplazamiento generacional, t_{rg} , es decir, en el porcentaje de hijos generados con respecto del tamaño de la población.

Si bien en la idea primitiva de Holland (1975) [42] dicho reemplazamiento se efectuaba de l en l , es decir $t_{rg} = \lambda^{-l}$, habitualmente dicho reemplazamiento se efectúa en bloque, $t_{rg} = 1$. De Jong (1975) [39] introdujo el concepto de tasa de reemplazamiento generacional con el objetivo de efectuar un solapamiento controlado entre padres e hijos. En su trabajo, en cada paso una proporción, t_{rg} , de la población es seleccionada para ser cruzada. Los hijos resultantes podrían reemplazar a miembros de la población anterior. Este tipo de Algoritmos Genéticos se conocen bajo el nombre de SSGA (*Steady State Genetic Algorithm*), un ejemplo de los mismos lo constituye GENITOR (Whitley y Kauth, 1988 [49]; Whitley, 1989 [50]).

Michalewicz (1992) [51] introduce un algoritmo, que denomina Algoritmo Genético Modificado, MODGA, en el que para llevar a cabo el reemplazamiento generacional, selecciona al azar r_1 individuos para la reproducción, así como r_2 individuos (distintos de los anteriores) destinados a morir. Estas selecciones aleatorias tienen en consideración el valor de la función objetivo de cada individuo, de tal manera que cuanto mayor es la función objetivo, mayor es la probabilidad de que sea seleccionado para la reproducción, y menor es la probabilidad de que dicho individuo fallezca. El

resto de los $\lambda - (r_1 + r_2)$ individuos son considerados como neutros y pasan directamente a formar parte de la población en la siguiente generación.

6.2.7 Algoritmos Genéticos Paralelos

En este apartado se introducirán tres maneras diferentes de explotar el paralelismo de los Algoritmos Genéticos, por medio de los denominados modelos de islas. Para una profundización sobre el tema puede consultarse Stender (1993) [52].

6.2.7.1 Modelos de islas

La idea básica de los modelos de islas consiste en dividir la población total en varias subpoblaciones en cada una de las cuales se lleva a cabo un Algoritmo Genético. Cada cierto número de generaciones, se efectúa un intercambio de información entre las subpoblaciones, proceso que se denomina emigración. La introducción de la emigración hace que los modelos de islas sean capaces de explotar las diferencias entre las diversas subpoblaciones, obteniéndose de esta manera una fuente de diversidad genética. Cada subpoblación es una “isla”, definiéndose un procedimiento por medio del cual se mueve el material genético de una “isla” a otra. La determinación de la tasa de migración es un asunto de capital importancia, ya que de ella puede depender la convergencia prematura de la búsqueda.

Se pueden distinguir diferentes modelos de islas en función de la comunicación entre las subpoblaciones. Algunas comunicaciones típicas son las siguientes:

- Comunicación en estrella, en la que existe una subpoblación que es seleccionada como maestra (aquella que tiene mejor media en el valor de la función objetivo), siendo las demás consideradas como esclavas. Todas las subpoblaciones esclavas mandan sus h_1 mejores individuos ($h_1 \geq 1$) a la subpoblación maestra, la cual, a su vez manda sus h_2 mejores individuos ($h_2 \geq 1$) a cada una de las subpoblaciones esclavas (véase figura 6.10).

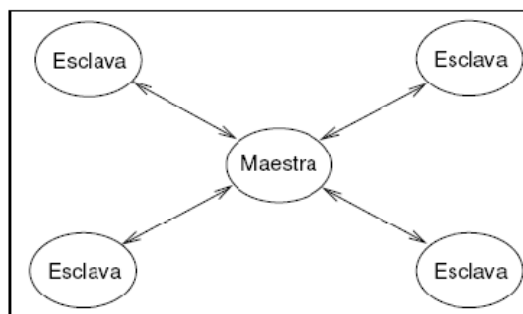


Figura 6.10 Algoritmo Genético Paralelo. Modelo de Islas. Comunicación en estrella.

- Comunicación en red, en la que no existe una jerarquía entre las subpoblaciones, mandando todas y cada una de ellas sus h_3 ($h_3 \geq 1$) mejores individuos al resto de las subpoblaciones (figura 6.11).

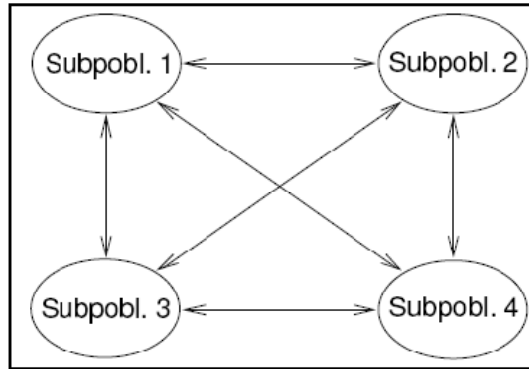


Figura 6.11 Algoritmo Genético Paralelo. Modelo de Islas. Comunicación en red

- Comunicación en anillo, en la que cada subpoblación envía sus h_4 mejores individuos ($h_4 \geq 1$) a una población vecina, efectuándose la migración en un único sentido de flujo (figura 6.12).

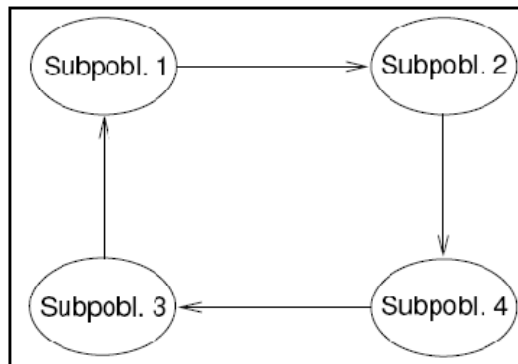


Figura 6.12 Algoritmo Genético Paralelo. Modelo de Islas. Comunicación en anillo.

6.2.8 Evaluación de Algoritmos Genéticos

Las tres medidas de evaluación que se tratarán en este apartado, fueron introducidas por De Jong (1975) [39], y se conocen como:

- evaluación on-line.
- evaluación off-line.

- evaluación basada en el mejor.

Si se denota por $v_i(t)$ la función objetivo del i -ésimo individuo ($i = 1, \dots, \lambda$) en la t -ésima población, la evaluación on-line, después de T iteraciones, se denota por $v^{on-line}(T)$, y se define como:

$$v^{on-line}(T) = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{\lambda} v_i(t)}{\lambda T} \quad (6.5)$$

Es decir, la evaluación on-line mide el comportamiento medio de todas las ristas generadas hasta el tiempo T .

La evaluación off-line se refiere al comportamiento del Algoritmo Genético en su proceso de convergencia hacia el óptimo. Si se denota por $v^*(t)$ al mejor valor de la función objetivo obtenido hasta el tiempo t (incluyendo dicho tiempo), y si $v^{off-line}(T)$ denota la evaluación off-line después de T generaciones, se tiene que:

$$v^{off-line}(T) = \frac{\sum_{t=1}^T v^*(t)}{T} \quad (6.6)$$

La definición de evaluación basada en el mejor trata de evaluar el Algoritmo Genético por medio del mejor valor de la función de evaluación encontrado en la evolución. Se trata por tanto de la medida de evaluación usual al tratar de estudiar el comportamiento de cualquier técnica heurística.

7 Resultados Experimentales

7. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los objetivos fundamentales del presente proyecto son caracterizar el comportamiento dinámico de un amortiguador magneto-reológico y la determinación de un modelo que permita simular el comportamiento dinámico del mismo. Para esto se va a emplear un amortiguador magneto-reológico RD-1005-3 comercializado por Lord Corporation (Ver Anexo 1). Dicho amortiguador puede ser alimentado por una corriente cuyo valor está comprendido entre 0 y 2 A. La resistencia de la bobina del interior del pistón es de $5\ \Omega$ a temperatura ambiente y la máxima longitud del amortiguador extendido es de 208 mm con un diámetro de 41,4 mm.

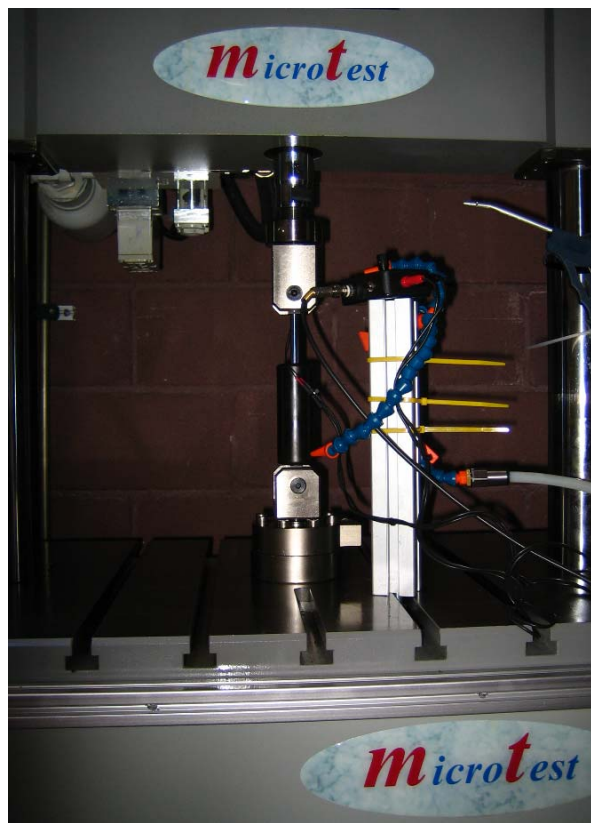


Figura 7.1 Ensayo amortiguador magneto-reológico.

La forma más usual para obtener las curvas características de un amortiguador magneto-reológico, y con ello poder estudiar su comportamiento, es aplicando un desplazamiento sinusoidal de una frecuencia y amplitud determinadas para una corriente de alimentación constante.

La figura 7.1 muestra un amortiguador magneto-reológico RD-1005-3 y el banco de amortiguadores utilizados para la obtención de los datos experimentales. Este banco de ensayos dispone de un actuador hidráulico que permite aplicar al amortiguador ciclos de desplazamiento de distinta amplitud y frecuencia. Los ensayos fueron realizados sometiendo al amortiguador a ciclos de amplitud 16 mm y frecuencia 6 Hz. Se eligió

una frecuencia de 6 Hz debido a que es un valor intermedio correspondiente al rango de frecuencias predominantes en la dinámica vertical de un vehículo ($\sim 0\text{-}15$ Hz). El banco de ensayos está equipado con un sensor de desplazamiento para medir el desplazamiento x del pistón del amortiguador y una célula de carga para medir la fuerza de salida que ejerce el amortiguador f . Las señales x y f son muestreadas a una frecuencia de 1 Hz. La velocidad v es obtenida a partir de la derivada del desplazamiento con respecto al tiempo.

En las figuras 7.2 y 7.3 se muestran las curvas características del amortiguador magneto-reológico RD-1005-3, fuerza-desplazamiento y fuerza-velocidad, respectivamente, que se han obtenido en el banco de ensayos anteriormente mencionado sometiendo al amortiguador a un desplazamiento sinusoidal de 16 mm.

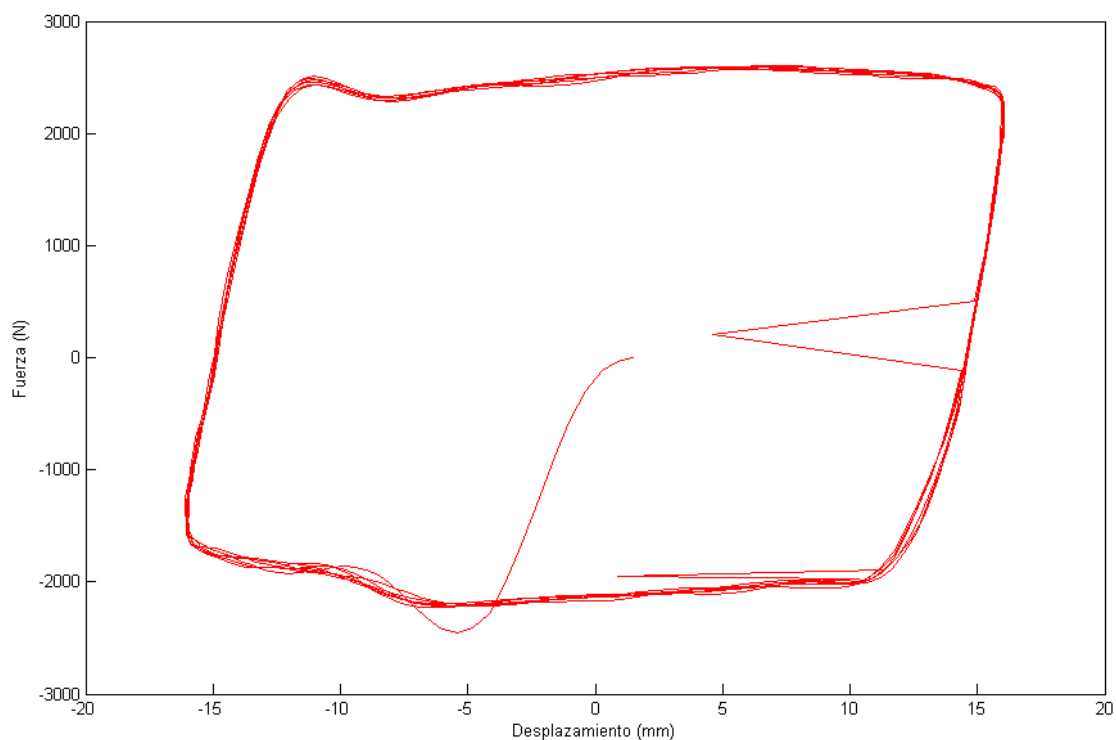


Figura 7.2 Curva característica del amortiguador magneto-reológico RD-1005-3. Fuerza-Desplazamiento.

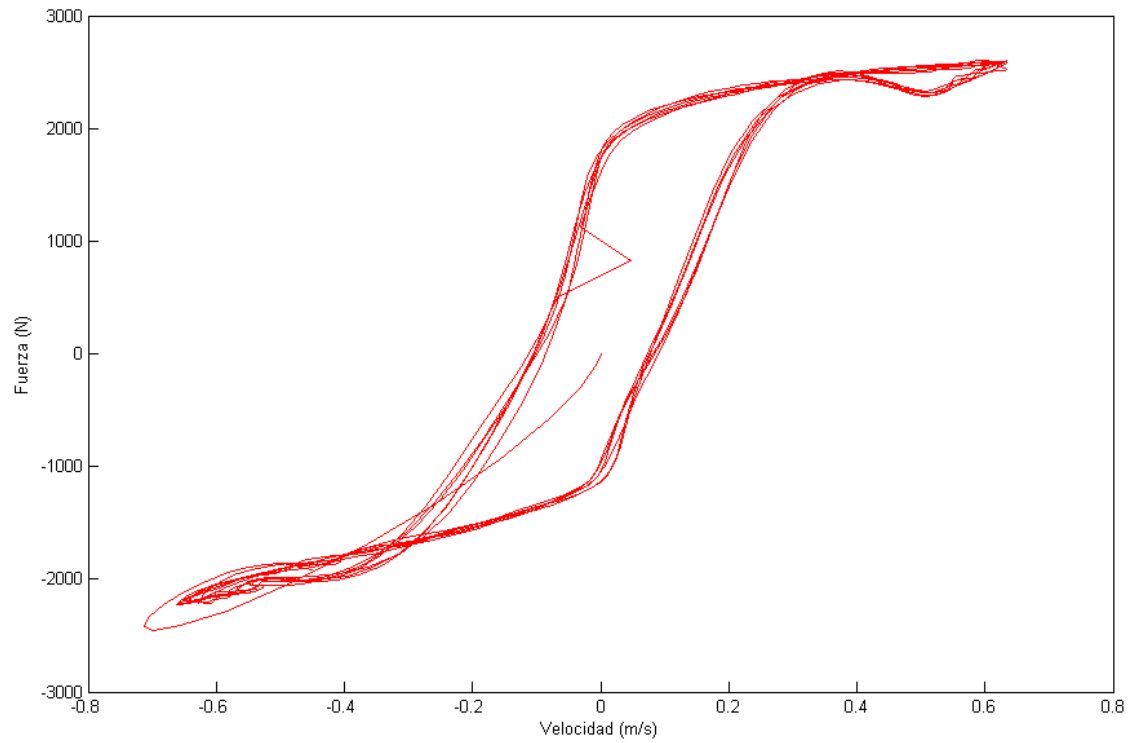


Figura 7.3 Curva característica del amortiguador magneto-reológico RD-1005-3. Fuerza-Velocidad.

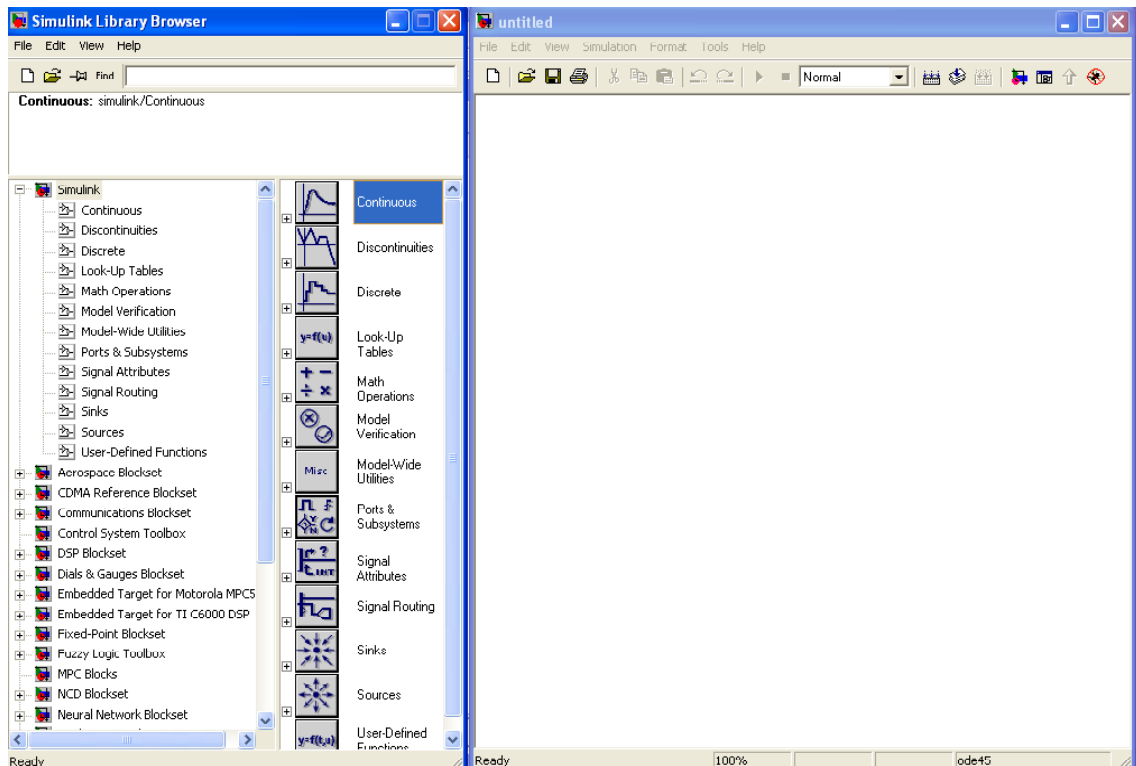


Figura 7.4 Librerías (Izquierda) y Espacio de trabajo de Simulink (Derecha).

Para la implementación del modelo de Bouc-Wen se ha utilizado Simulink, que es un software que funciona bajo la plataforma de Matlab y es una herramienta muy útil para modelar, simular y analizar sistemas, tanto lineales como no lineales. Permite al usuario realizar sus estudios, tanto en el dominio del tiempo como el de Laplace, expresar las funciones de transferencia en las diferentes formas incluyendo la del espacio de los estados y otras opciones. En una interfaz gráfica (GUI), como la que se observa en la Figura 7.4, el usuario construye un diagrama de bloques que desarrollan procedimientos que realizan las operaciones matemáticas requeridas para la solución de un modelo.

En la figura 7.5 se muestran las entradas (el tiempo t y la intensidad de corriente i suministrada al amortiguador) y salidas del modelo (la fuerza F que ejerce el amortiguador y el desplazamiento x que sufre en cada instante de tiempo), mientras que en la figura 7.6 se puede ver el modelo de Bouc-Wen implementado con Simulink, y en las figuras 7.7, 7.8 y 7.9 se muestran las ecuaciones del modelo de Bouc-Wen.

Mediante Algoritmos Genéticos se quiere ajustar el modelo de Bouc-Wen a las características reales de un amortiguador magneto-reológico, en este caso el RD-1005-3 comercializado por Lord, para ello se obtienen valores para los coeficientes que forman parte de las ecuaciones del modelo de Bouc-Wen: d , n , g , α , c_0 , k_0 , c_1 , k_1 y k , donde los parámetros d , n , g , α y k_1 son “parámetros de lazo”, los cuales controlan la forma y la magnitud de los lazos de histéresis; mientras que los parámetros c_0 , k_0 , c_1 y k_1 son parámetros que dependen de la corriente aplicada al amortiguador $i=i(t)$: $c_0=c_0(t)$, $k_0=k_0(t)$, $c_1=c_1(t)$ y $k_1=k_1(t)$.

Estudios de MGuiclea, T Sireteanu, D Satancioiu y C. W. Satmmers [54] muestran en qué forma dependen estos parámetros de la intensidad de corriente aplicada al amortiguador. También revelan que el parámetro k_0 tiene una variación bastante irregular con respecto a la corriente suministrada al amortiguador, con lo que se le ha dado un valor promedio. Para los parámetros restantes se han obtenido las siguientes funciones:

$$c_0(i) = 3i + 5.164 \quad (7.1)$$

$$c_1(i) = 1150 \tanh(1.95i) \quad (7.2)$$

$$k_1(i) = 4500 \tanh(1.3i) \quad (7.3)$$

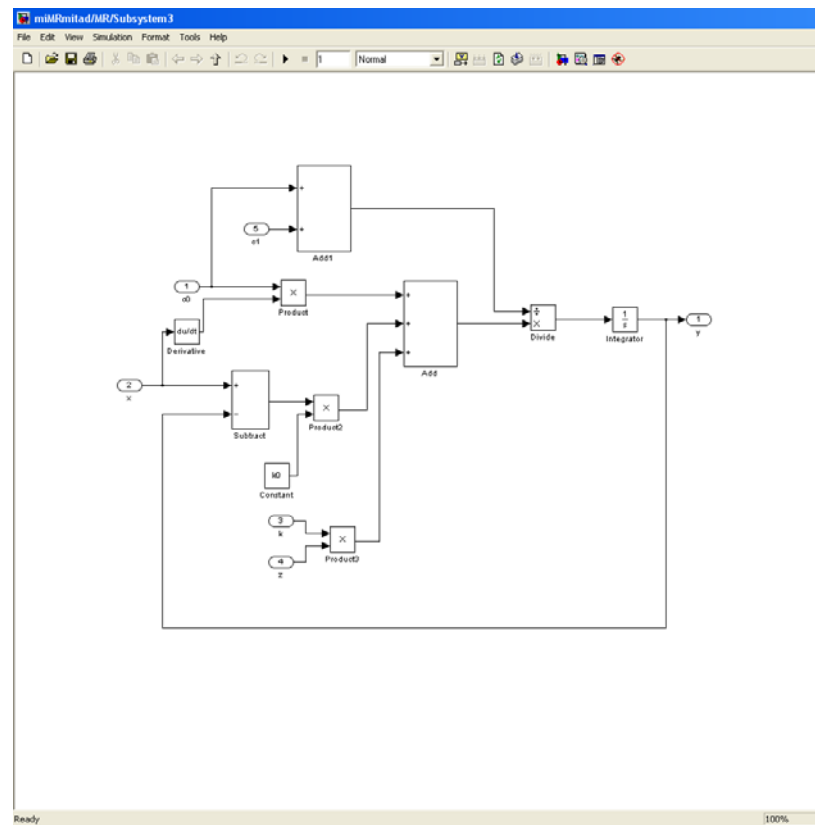


Figura 7.7 El desplazamiento parcial relativo y .

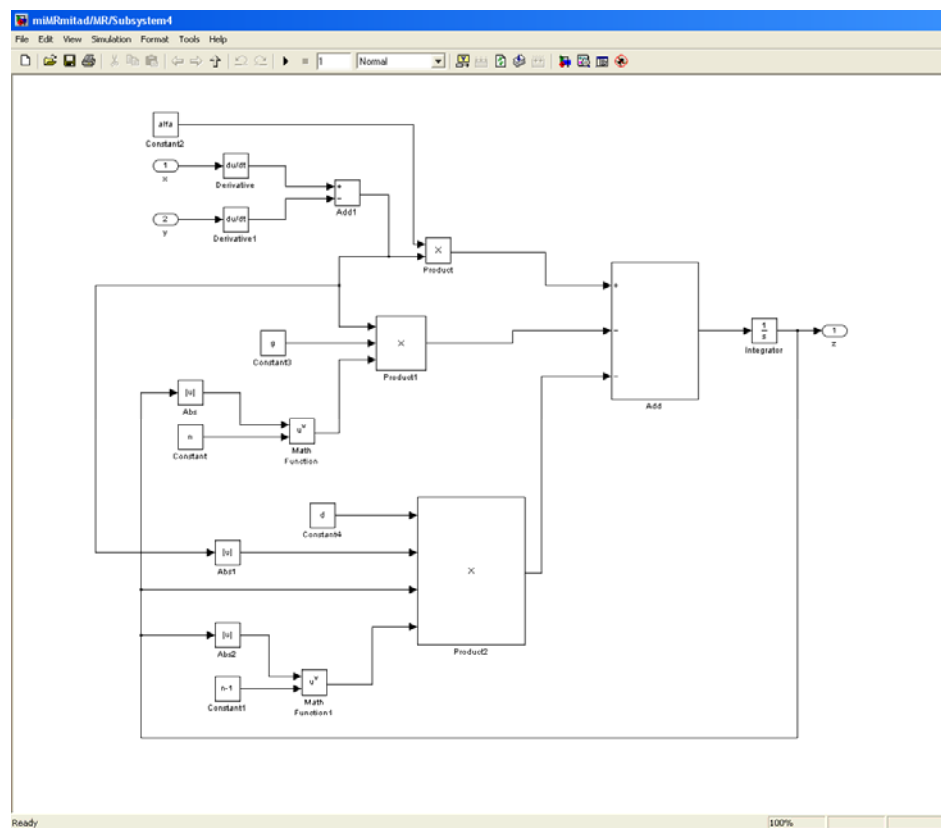


Figura 7.8 La variable evolutiva z .

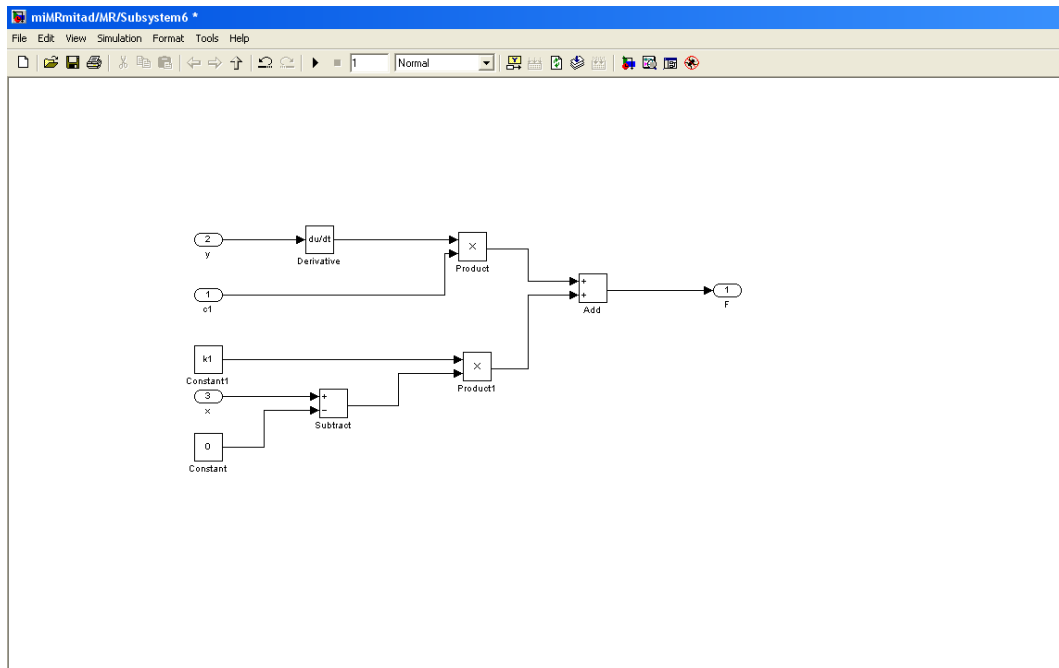


Figura 7.9 Cálculo de la fuerza F generada.

A la hora de realizar una optimización mediante Algoritmos Genéticos, es necesario determinar un criterio de parada, para que el sistema deje de iterar una vez se haya obtenido el óptimo de la función. Este criterio de parada se establece a partir de la función salud. El tiempo que emplea el sistema para llegar a la solución que se quiere obtener dependerá en gran medida de qué función salud se utilice, pudiendo incluso no llegar a una solución si la función salud no es adecuada. En este caso, se ha escogido la siguiente función que hará de criterio de parada:

$$f_{salud} = \frac{1}{1-error} \quad (7.4)$$

La simulación se ha realizado con una población de 500 individuos, con una probabilidad de cruce del 80%, mientras que la probabilidad de mutación era del 15%. La corriente suministrada al amortiguador magneto-reológico es de 1,73 A. Se han obtenido los siguientes resultados que se recogen en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Valor de los parámetros del modelo de Bouc Wen.

d (N/m)	n	g (m ⁻²)	α	c ₀ (Ns/m)	k ₀ (N/m)	c ₁ (Ns/m)	k ₁ (N/m)	k (N/m)
10 ⁵	2	10 ⁶	25	1080	700	136000	100	94400

Como resultado, se han obtenido las curvas características del amortiguador magneto-reológico, fuerza-desplazamiento y fuerza-velocidad, que se muestran en las figuras 7.10 y 7.11 respectivamente, a partir de los parámetros del modelo de Bouc-Wen optimizados:

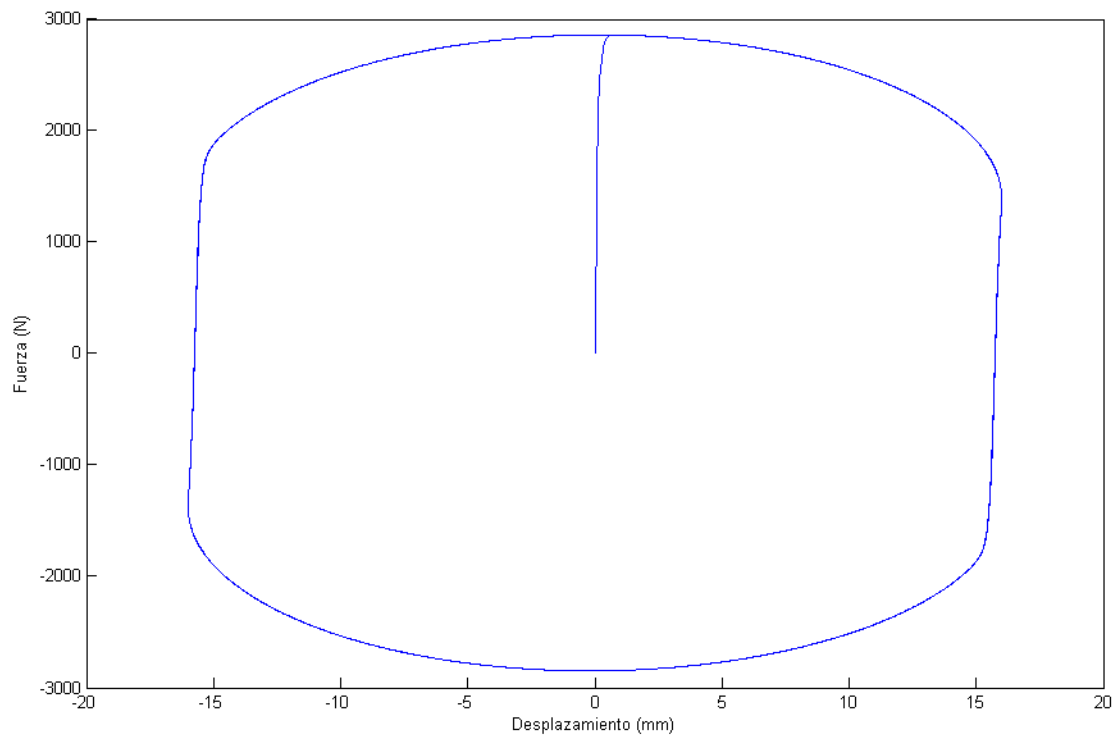


Figura 7.10 Simulación de la curva característica del amortiguador. Fuerza-Desplazamiento.

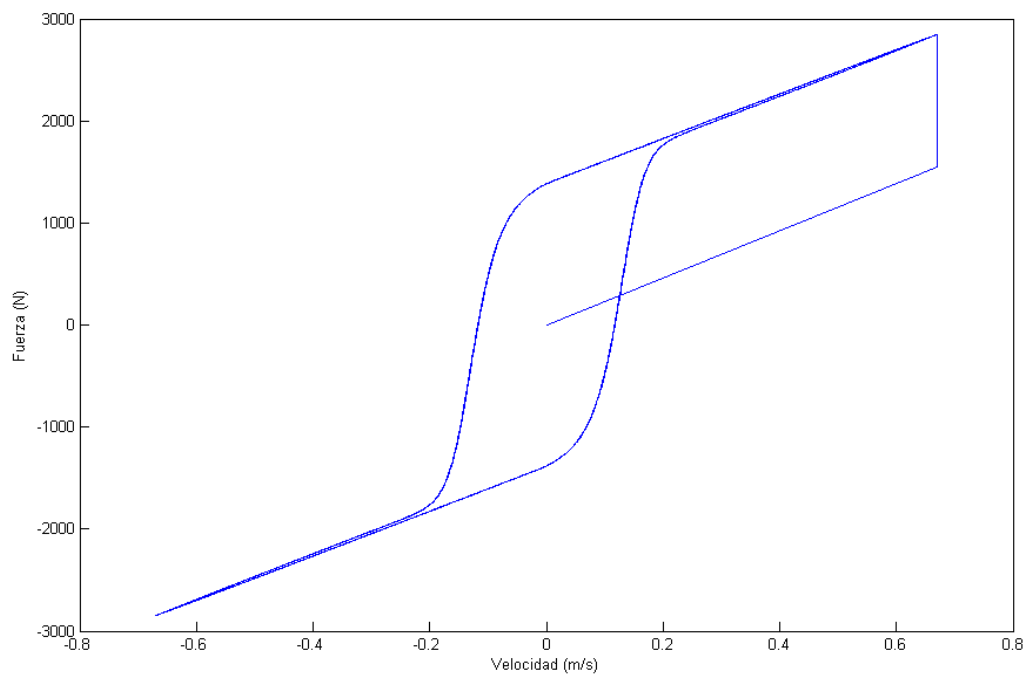


Figura 7.11 Simulación de la curva característica del amortiguador. Fuerza-Velocidad.

En las figuras 7.12 y 7.13 se pueden ver como se ajustan la curva de fuerza-velocidad y la curva fuerza-desplazamiento, respectivamente, del amortiguador magneto-reológico teórica a la obtenida experimentalmente en el banco de ensayos.

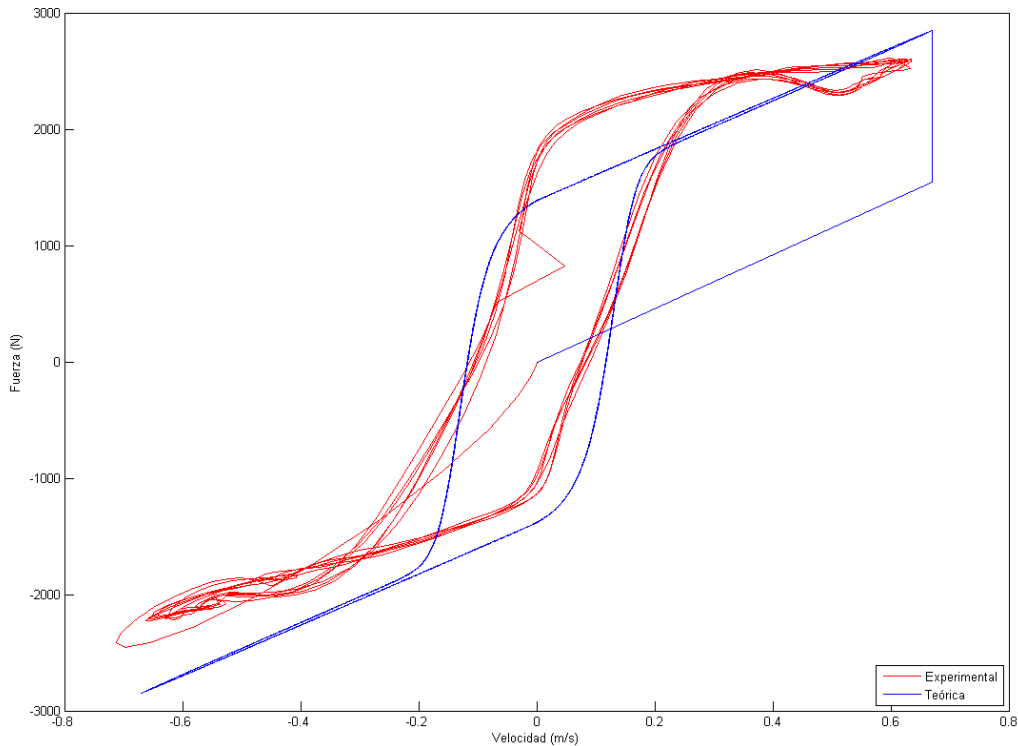


Figura 7.12 Curvas Fuerza-Velocidad experimental y teórica.

Como se puede ver en las figuras 7.12 y 7.13 el modelo de Bouc-Wen simula que el amortiguador tiene un comportamiento simétrico, es decir que el amortiguador se comporta igual cuando está trabajando a compresión que cuando está recuperando su posición nominal. Como se puede ver en la figura 7.12 esto no es cierto, ya que se puede apreciar una notable diferencia en la inclinación de los lazos histéricos de la curva experimental, además la fuerza que suministra el amortiguador en ambos casos no es la misma, que llega en torno a los 2600 N en la etapa de expansión, mientras que apenas llega a los 2200 N en la etapa de compresión.

Para evitar esto se ha optado por realizar la simulación escogiendo la parte de la gráfica en la que las fuerzas ejercidas sobre el amortiguador son positivas, con el fin de obtener una mejor solución. Los resultados obtenidos se muestran en la figuras 7.14 y 7.15.

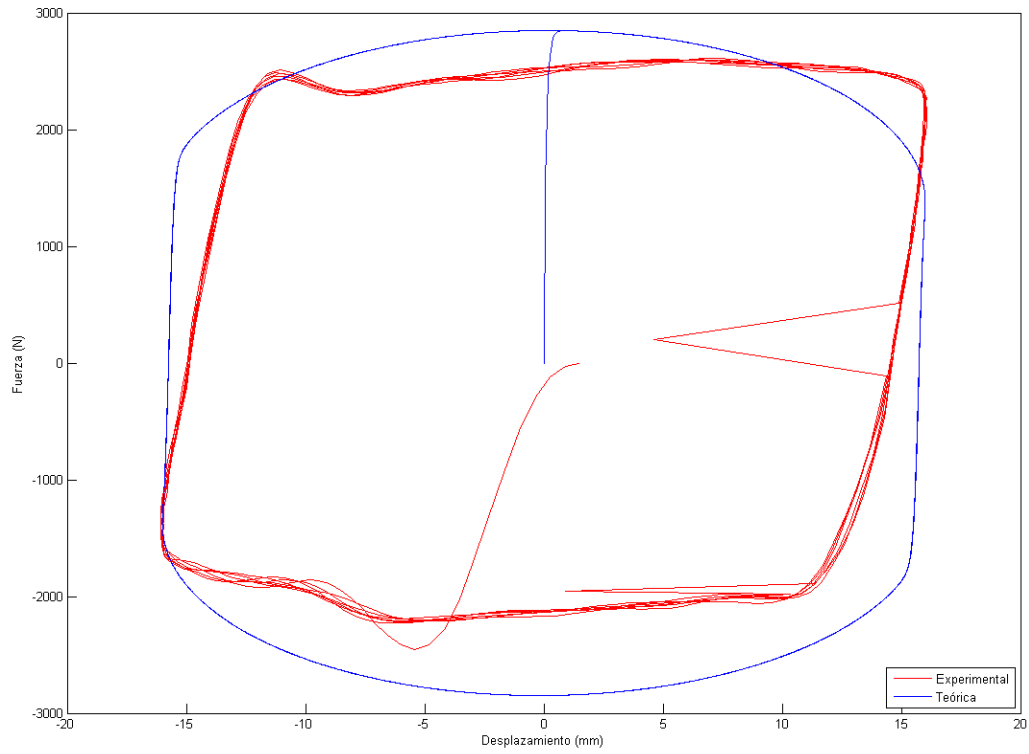


Figura 7.13 Curvas Fuerza-Desplazamiento experimental y teórica.

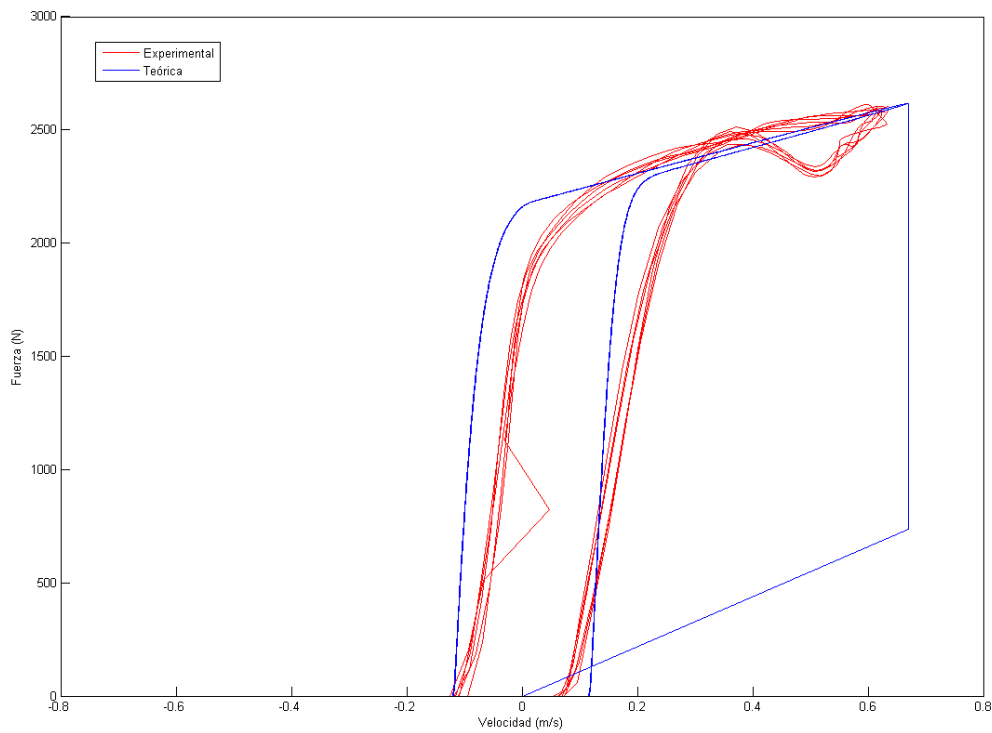


Figura 7.14 Curvas Fuerza-Velocidad experimental y teórica cuando las fuerzas ejercidas sobre el amortiguador son positivas.

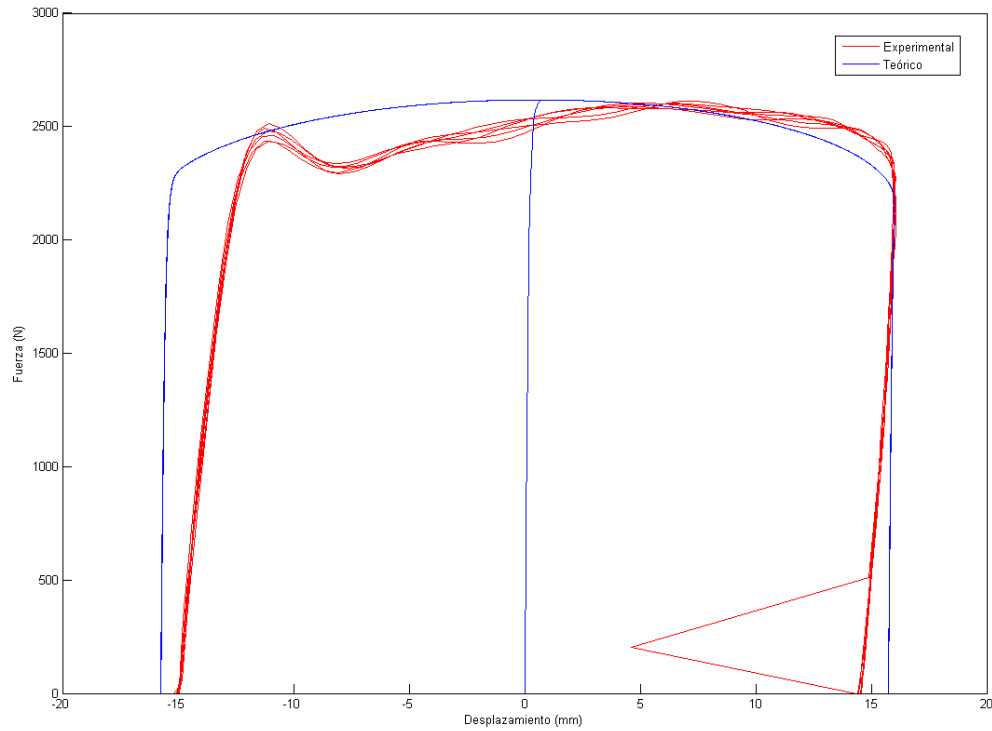


Figura 7.15 Curvas Fuerza-Desplazamiento experimental y teórica cuando las fuerzas ejercidas sobre el amortiguador son positivas.

Para obtener estos resultados se han tenido que variar las ecuaciones que definen a los coeficientes c_0 , c_1 y k_1 en función de la intensidad:

$$c_0(i) = i + 5.164 \quad (7.5)$$

$$c_1(i) = 1150 \tanh(1.95i) \quad (7.6)$$

$$k_1(i) = 4650 \tanh(1.3i) \quad (7.7)$$

En la tabla 7.2 se muestran los valores obtenidos para los coeficientes del modelo de Bouc-Wen obtenidos para la etapa de expansión del amortiguador magneto-reológico.

Tabla 7.2 Valor de los parámetros del modelo de Bouc Wen, obtenidos cuando las fuerzas ejercidas sobre el amortiguador son positivas.

d (N/m)	n	g (m ⁻²)	α	c_0 (Ns/m)	k_0 (N/m)	c_1 (Ns/m)	k_1 (N/m)	k (N/m)
10^5	2	10^6	25	990	740	135400	100	93370

Adicionalmente, se ha realizado un análisis cuantitativo de los errores. Para ello, se definen los errores siguientes como función del tiempo, del desplazamiento y de la velocidad, respectivamente [23]:

$$E_t = \frac{\varepsilon_t}{\sigma_F} \quad (7.8)$$

$$E_x = \frac{\varepsilon_x}{\sigma_F} \quad (7.9)$$

$$E_{\dot{x}} = \frac{\varepsilon_{\dot{x}}}{\sigma_F} \quad (7.10)$$

donde

$$\varepsilon_t^2 = \int_0^T (F_{exp} - F_{neural})^2 dt \quad (7.11)$$

$$\varepsilon_x^2 = \int_0^T (F_{exp} - F_{neural})^2 \left| \frac{dx}{dt} \right| dt \quad (7.12)$$

$$\varepsilon_{\dot{x}}^2 = \int_0^T (F_{exp} - F_{neural})^2 \left| \frac{d\dot{x}}{dt} \right| dt \quad (7.13)$$

$$\sigma_F^2 = \int_0^T (F_{exp} - \mu_F)^2 dt \quad (7.14)$$

y F_{exp} representa la fuerza experimental o medida, F_{neural} es la fuerza estimada por el modelo de Bouc-Wen y μ_F es el valor medio de la fuerza experimental durante el periodo T .

Los resultados de los errores obtenidos se recogen en la tabla 7.3, tanto para el caso en el que el amortiguador trabaja a compresión y tracción, como para cuando a este solo se le ejercen fuerzas positivas.

Tabla 7.3 Errores cometidos con el modelo de Bouc-Wen.

Recorrido	E_t	$E_x (m)$	$E_{\dot{x}}(m/s)$
Modelo 1 (Recorrido completo)	2,4367	0,0247	0,9996
Modelo 2 (Fuerzas positivas)	1,1261	0,0115	0,4597

Se puede apreciar en los resultados obtenidos que los errores que se cometen utilizando el modelo de Bouc-Wen se reducen, en torno a un 65%, si se realiza la simulación con cuando el amortiguador trabaja solo con fuerzas positivas, debido a que, como se ha mencionado anteriormente, el modelo desarrollado por Bouc-Wen es simétrico y supone

el mismo comportamiento del amortiguador en la carrera de compresión y en la de tracción que, como puede verse en las figuras 7.2 y 7.3, no es lo que ocurre en realidad.

Si se comparan estos errores con los errores obtenidos en estudios previos, Spencer et al. [54], ver tabla 7.4, se observa que los errores obtenidos son grandes. Esto es debido a que en dichos estudios el valor de un gran número de parámetros se establece a priori, por lo que el número de variables a optimizar es reducido, mientras que en este trabajo se optimizan todos los parámetros posibles sin establecer unos valores determinados por lo que el espacio de búsqueda es mayor.

Tabla 7.4 Comparación de los errores cometidos con el modelo desarrollado por Spencer et al., Phenomenological Bouc-Wen model, y los errores cometidos con el modelo del presente proyecto.

Modelo	E_t	$E_x (m)$	$E_{\dot{x}}(m/s)$
Phenomenological Bouc-Wen model	0,0351	0,0228	0,0445
Modelo 2 (Fuerzas positivas)	1,1261	0,0115	0,4597

8 Conclusiones y Desarrollos Futuros

8. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

8.1. Conclusiones

El objetivo fundamental de este proyecto era caracterizar un amortiguador magneto-reológico y realizar un modelo que se empleara para la simulación de su comportamiento dinámico.

Atendiendo a los resultados obtenidos (véase apartado 7), se puede afirmar que el modelo realizado cumple las expectativas iniciales del presente proyecto que, aún ofreciendo un error relativamente grande, se ha llegado a una buena solución ya que se trabaja con un gran número de parámetros a los que hay que optimizar. También hay que tener en cuenta que el modelo de Bouc-Wen es un modelo simétrico, es decir, supone el mismo comportamiento del amortiguador en la carrera de compresión y en la de tracción, siendo esto otra gran fuente de error. De hecho puede verse que el error cometido disminuye considerablemente, en torno al 65%, cuando se discrimina la etapa en la que el amortiguador está recuperando su posición nominal, lo que quiere decir que si se emplea un modelo que no suponga un comportamiento simétrico del amortiguador se reducirán los errores cometidos.

También hay que tener en cuenta que la función salud escogida es sencilla, con el fin de que el proceso de iteración no se extendiera en el demasiado en el tiempo, dando la posibilidad de desarrollar trabajos futuros sobre esa vía.

8.2. Desarrollos futuros

Futuros desarrollos pueden dirigirse a la realización de un modelo más refinado, en el que se tenga en cuenta el comportamiento no simétrico del amortiguador cuando este está trabajando a compresión y cuando está regresando a su posición nominal, y así obtener un modelo que se ajuste más al funcionamiento real del amortiguador.

También se pueden emplear una función salud más compleja a la empleada en el presente proyecto, que aunque repercuta en el tiempo de iteración ofrezca unos mejores resultados.

Puede realizarse un estudio en el que se trabaje con todo el rango de intensidades que se pueden suministrar al amortiguador magneto-reológico (de 0 a 2 A).

El modelo desarrollado en el presente proyecto podría servir de apoyo a la hora de desarrollar un amortiguador magneto-reológico propio.

9

Anexos

9. ANEXO

LORD Rheonetic™ Magnetically Responsive Technology

MR Damper RD-1005-3 Product Bulletin



General

RD-1005-3 is a compact magneto-rheological (MR) fluid damper unsurpassed in its combination of controllability, responsiveness, and energy density. As a magnetic field is applied to the MR fluid inside the monotube housing, the damping characteristics of the fluid increase with practically infinite precision and in under 25-millisecond response time. Featuring straightforward controls, simple design, and quiet operation, this MR damper is especially well suited for suspension applications.

Recommended Accessories

Wonder Box™ Device Controller (Lord part number RD-3002-03), which includes a power supply and banana plugs.

Benefits

- Precise and instantaneous control
- Continuously variable damping
- Low voltage and current requirements
- Industrial durability
- Real-time control
- Simple electronics
- Immediate implementation
- Long life

Special Instructions

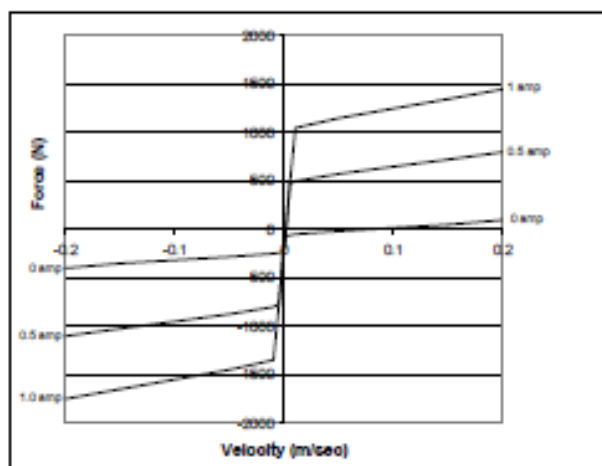
- RD-1005-3 is monotube shock containing high-pressure nitrogen gas (300psi). Handle with care and do not heat or puncture body.
- Operating temperature of the outer body of the damper should not exceed 160° F (71° C).
- Maximum extension force should be kept below 1000 pounds (4448 N).
- It is recommended that the maximum continuous current should not exceed 1 amp. MR dampers are rated for 2 amps with intermittent duty.

Typical Data*

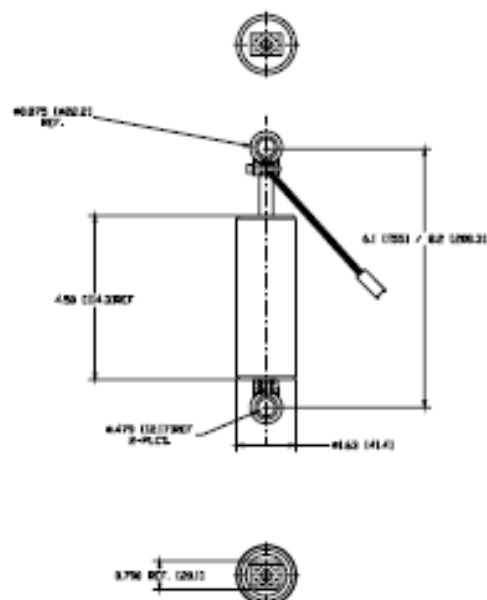
Compressed Length	6.1 inches (155 mm)
Extended Length	8.2 inches (208 mm)
Body Diameter	1.63 inches (41.4 mm)
Shaft Diameter	0.390 inches (10 mm)
Weight	1.8 pounds (800 g)
For Installation on Pin	0.47 inches (12 mm)
Electrical Characteristics:	
Input Current	2 amps maximum
Input Voltage	12 V DC
Resistance	5 ohms at ambient temperature
Resistance	7 ohms at 160° F (71° C)
Damper Forces: (Peak to Peak)	
2 in/sec at 1 amp	>500 pounds (2224 N)
8 in/sec at 0 amp	< 150 pounds (667 N)
Mechanical Characteristics:	
Minimum Tensile Strength	1000 pounds (4448 N)
Maximum Operating Temperature	160° F (71° C)
Storage Temperature Limits	212° F to -40° F (100° C to -40° C)
Durability	2 million cycles @ ± 0.5 inches (± 13 mm), 2 hertz with input current varying between 0 and 0.8 amps.
Response Time (amplifier & power supply dependent)	< 25 msec – time to reach 90% of max level during a 0 to 1 amp step input @ 2 in/sec (51 mm/sec).
Damper Connector: (2 pin)	Body: Molex # 03-06-2023 Pins: Molex # 02-06-2103
Mating Connector: (2 pin)	Body: Molex # 03-06-1023 Pins: Molex # 02-06-1103

* Data is typical and not to be used for specification purposes.

LORD
SOLUTIONS FOR A WORLD IN MOTION

LORD Rheonetic™ Damper**RD-1005-3 Product Bulletin**

Typical Force vs. Velocity Profile. Values are representative and not for design purposes. Offset at origin is due to gas precharge required for temperature compensation and to prevent cavitation.



For additional information, please contact us at:
 Lord Corporation, Materials Division, Customer Service Department
 406 Gregson Drive, P.O. Box 8012, Cary, NC 27511
 Telephone: 888-811-5673, ext. 2124 Telephone Outside the U.S.: 919-469-2500, ext. 2124 Fax: 919-481-0349
 E-mail: mrftulid@lord.com or visit us at our website at www.mrftulid.com

Values stated in this bulletin represent typical values as not all tests are run on each lot of material produced. For formalized product specifications for specific product end uses, please contact our Customer Service Department. Information provided herein is based upon tests believed to be reliable. In as much as Lord Corporation has no control over the manner in which others may use this information, it does not guarantee the results obtained by others. In addition, Lord Corporation does not guarantee the performance of the product or the results or implied warranty of merchantability, or fitness for a particular purpose concerning the effects or results of such uses.

Rheonetic is a trademark of Lord Techmark, Inc., a subsidiary of Lord Corporation.

2003-19-1

Printed in USA © 2003, Lord Corporation

LORD

SOLUTIONS FOR A WORLD IN MOTION

10 Bibliografía

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] “*Suspensión pilotada*”, José Fernando Moraleda.
- [2] “*Estudio Comparativo de Diferentes Modelos de Suspensión Utilizando VRML.*”, Proyecto Fin de Carrera, Joaquín Cuesta Hernampérez, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés 2003.
- [3] Memoria de proyecto de mejora de la suspensión del vehículo Car-Cross, Carlos Echevarría García, Escuela Superior de ingenieros de San Sebastián, 2003.
www.tecnun.es/automocion/proyectos/hardware_suspension/memoria.pdf
- [4] “*Teoría de Vehículos Automóviles*”, F. Aparicio, C. Vera, V. Díaz, Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid.
- [5] Cursos de mecánica. Suspensión.
http://www.mecanicavirtual.org/indice_cursos.html
- [6] Web Monografías, trabajo acerca de los tipos de amortiguadores:
<http://monografias.com/trabajos22/sistema-suspension/sistema-suspension.shtml>
- [7] La suspensión de un automóvil tuneado. Web sobre sistema de suspensión:
<http://tuning.deautomoviles.com.ar/articulos/suspension.html>
- [8] “*Amortiguadores y suspensión*”. Manuales de automoción. Juan Alberdi Urdieta. Universidad de Navarra. Enero 2003.
- [9] Diccionario Web de la revista Autopista.es dentro de la página de motor de Terra: <http://motor.terra.es/motor/servicio/definicion.cfm?id=7>
- [10] *Seguridad Activa*, Tráfico, Septiembre-Octubre 2001.
- [11] Amortiguadores convencionales y ajustables (funcionamiento básico):
<http://www.ejeadigital.com/motor/articulo.php?id=54>
- [12] <http://www.plastounivers.com>
- [13] *Materiales Compuestos Inteligentes*. Luz Stella Arias Maya y Libardo Vanegas Useche, Scientia et Technica Año X, No 25, Agosto 2004.
- [14] El Centro Tecnológico Gaiker, desarrolla una línea de trabajo basada en el estudio y aplicación de los materiales denominados como “inteligentes” mediante la realización de proyectos privados y el liderazgo y coordinación del consorcio ACTIMAT. Lina Matellanes, J. M^a Cuevas, Raquel Clemente y Sandra Allué. Centro Tecnológico Gaiker.

- [15] *Materiales inteligentes I/II. Introducción a los materiales del siglo XXI*, Oscar Lopez Garcia, Alberto Carnicero Lopez y Rosa Ruiz Pablos.
- [16] *Estudio experimental de fenómenos de agregación y desagregación de cadenas de partículas magnéticas en suspensión*, P. Domínguez-García, Sonia Melley y M. A. Rubio.
- [17] *Amortiguadores por Fluidos Magnetoreológicos*, Iker Irazá, Alejeandro Falkner, Urtzi Montalvo. <http://www.tecnun.es/>
- [18] Fluidos reológicos: <http://www.fisfun.uned.es/~mar/LSC/fluidos.htm>
- [19] *Amortiguadores magnetoreológicos*, Miguel Cupich Rodríguez y Fernando J. Elizondo garza, Ingenierías, Julio-Diciembre 1998.
- [20] Web oficial de Lord: <http://www.lord.com/>
- [21] Estudio experimental acerca de los amortiguadores magnetoreológicos. http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07022003-102302/unrestricted/04_Body.pdf
- [22] *Characterization and Analysis of Magnetorheological Damper Behavior Under Sinusoidal Loading*, Snyder, R. A., Kamath, G. M., and Wereley, N. M., AIAA Journal, Vol. 39, No. 7, 2001.
- [23] *Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper*, Spencer Jr., B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K., and Carlson, J. D., Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 123, 1997.
- [24] *Large-scale MR fluid dampers: Modeling and dynamic performance considerations*, Yang, G., Carlson, J. D., Sain, M. K., Spencer, B. F., Engineering Structures, Vol. 24, No.3, 2002.
- [25] *Dynamic Modeling of Semi-Active ER/MR Fluid Dampers*, Wang, X. and Gordaninejad, F., Damping and Isolation, Proceedings of SPIE Conference on Smart materials and Structures, Vol. 4331, Ed. Daniel J. Inman, 2001.
- [26] *Assessment of Time Response Characteristics of Electrorheological and Magnetorheological Dampers*, Choi, Y. T. and Wereley, N. M., Proceedings of SPIE, Vol. 4331, pp. 92-102, 2001.
- [27] *Modelling of magnetorheological damper*, T. Sireteanu, D. Stancioiu, G. Guita, S. Gheorghe, Proc. Rom. Acad., 2001.
- [28] *Neuro-fuzzy model of large magnetorheological dampers*, M. J. Peschel and P. N. Roschke, in Proceedings of the Texas Section of the American society of Civil Engineers, 2001.

- [29] *Semi-active vibration control by use of magnetorheological dampers*, T. Sireteanu, D. Stancioiu, G. H. Guita and C. W. Stammers, Proc. Rom. Acad. 2000.
- [30] *Model Parameter identification for Vehicle Vibration Control Magnetorheological Dampers Using Computational Intelligence Methods*, M. Guiclea, T. Sireteanu, D. Stancioiu y C. W. Stammers, Institute of Solid Mechanics, 2004.
- [31] *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, D. E. Goldberg, 1989.
- [32] C. Darwin (1859). "*On the Origin of Species by Means of Natural Selection*", Murray, Londres.
- [33] <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/temageneticos.pdf>
- [34] D.E. Goldberg (1989). "*Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*", Addison-Wesley, Reading, MA.
- [35] J.T. Alander (1992). "*On optimal population size of genetic algorithms*". Proceedings Com-pEuro 1992, Computer Systems and Software Engineering, 6th Annual European Computer Conference, 65-70.
- [36] D.E. Goldberg, J.T. Richardson (1987). "*Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization*". Genetic Algorithms and their Applications: Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, 41-49.
- [37] A. Brindle (1991). "*Genetic algorithms for function optimization*". Tesis doctoral, Universidad de Alberta, Canada.
- [38] J.E. Baker (1987). "*Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm*". Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, 14-21.
- [39] K.A. De Jong (1975). "*An analysis of the behaviour of a class of genetic adaptive systems*". Tesis doctoral, University de Michigan.
- [40] G. Syswerda (1991). "*Schedule optimization using genetic algorithms*". L. Davis (ed.). Handbook of Genetic Algorithms, Van Nostrand Reinhold, New York, 332-349.
- [41] P. Larrañaga, M. Poza (1994). "*Structure learning of Bayesian network by genetic algorithms*". E. Diday (ed.), New Approaches in Classification and Data Analysis, Springer-Verlag, 300-307.
- [42] J. Holland (1975). "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*", University of Michigan Press, Ann Arbor.

- [43] L. Davis (1985). "*Applying adaptive algorithms to epistatic domains*", en Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, 162-164.
- [44] J.D. Schaffer, R.A. Caruna, L.J. Eshelman, R. Das (1989). "*A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization*". J.D. Schaffer (ed.), Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, 51-60.
- [45] D.H. Ackley (1987). "*A Connectionist Machine for Genetic Hillclimbing*", Kluwer Academic Publishers.
- [46] M.F. Bramlette (1991). "*Initialization, mutation and selection methods in genetic algorithms for function optimization*". Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, 100-107.
- [47] T.C. Fogarty (1989). "*Varying the probability of mutation in the genetic algorithm*". Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, 104-109.
- [48] Z. Michalewicz, C.Z. Janikow (1991). "*Handling constraints in genetic algorithms*". Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, 151-157.
- [49] D. Whitley, J. Kauth (1988). GENITOR: "*A different genetic algorithm*". Proceedings of the Rocky Mountain Conference on Artificial Intelligence, Denver, CO, 118-130.
- [50] D. Whitley (1989). "*The GENITOR algorithm and selection pressure: Why rank-based allocation of reproductive trials is best*". Proceedings on the Third International Conference on Genetic Algorithms, 116-121.
- [51] Z. Michalewicz (1992). "*Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [52] J. Stender (1993). "*Parallel Genetic Algorithms: Theory and Applications*", IOS Press.
- [53] MGuiclea, T Sireteanu, D Satancioiu y C. W. Satmmers. "*Model parameter identification for vehicle vibration control with magnetorehological dampers using computational intelligence methods*". Institute of Solid Mechanics, Romanian Academy, Bucharest,Romania; and University of Bath, Bath, UK.
- [54] B. Spencer, s. Dyke, M. Sain, J. Carlson, "*Phenomenological model for magnetorheological dampers*", Journal of Engineering Mechanics 123 (1997) 230-238.